

Науковий збірник



**Центральноукраїнський
науковий вісник
Технічні науки**

**Central Ukrainian Scientific Bulletin
Technical Sciences**

Випуск 12(43)

Частина I

**Кропивницький
2025**

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

За загальною редакцією М.І. Черновола
Заснований у 1997 році

**В и п у с к 12(43)
Частина І**

Кропивницький • 2025

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Under the general editorship of M. Chernovol
Founded in 1997

**Issue 12(43)
Part I**

Kropyvnytskyi • 2025

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, IT-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 29 вересня 2025 року № 1.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Михайло ЧЕРНОВІЛ

Редакційна колегія: Віктор АУЛІН, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Сергій ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Олексій СМІРНОВ, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Олександр ДОРЕНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Андрій БАБІЙ, д-р техн. наук, проф.; Ірина БЕРЕЗЮК, канд. техн. наук, доц.; Варума АРІФА, Dr PhD (Niger); Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, проф.; Лариса ВІХРОВА, канд. техн. наук, проф.; Андрій ГАЛКІН, д-р техн. наук, проф.; Володимир ГАМАЛІЙ, д-р ф.-м. наук, проф.; Антон ГАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.; Дмитро ГОЛУБ, канд. техн. наук, доц.; Андрій ГРИНЬКІВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Віктор ДАРИЄНКО, канд. техн. наук, доц.; Олександр ДІДИК, канд. техн. наук, доц.; Микола ЗОЦЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Вячеслав ІВАЩУК, д-р техн. наук, доц.; Сергій КАРПУШИН, канд. техн. наук, доц.; Андрій КИРИЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Олександр КОВАЛЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Тетяна КОРЕНЬКОВА, д-р техн. наук, доц.; Олександр КУЗИК, канд. техн. наук, доц.; Василь МАТЕЙЧИК, д-р техн. наук, проф.; Анатолій МАЦУЙ, д-р техн. наук, проф.; Єлизавета МЕЛЕШКО, д-р техн. наук, проф.; Сергій ОСАДЧИЙ, д-р техн. наук, проф.; Віктор ПАШИНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; Микола ПАШИНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.; Петро ПЛІШКОВ, канд. техн. наук, проф.; Олександр РОССОЛОВ, д-р техн. наук, доц.; Сергій РУБАН, канд. техн. наук, доц.; Василь САЛЮ, д-р техн. наук, проф.; Сергій СМІРНОВ, канд. техн. наук, доц.; Михайло СТОРЧАК, д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Людмила ТАРАНДУШКА, д-р техн. наук, проф.; Геннадій ФІЛІМОНІХІН, д-р техн. наук, проф.; Ігор ШЕПЕЛЕНКО, д-р техн. наук, порф.; Володимир ЯЦУН, д-р техн. наук, доц.

Експерти – літературні редактори: Валерій МИЦЕНКО, канд. пед. наук, доц. (англійська мова); Тетяна БАБИЧ, канд. філол. наук, доц. (українська мова).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8, Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «*Україніка наукова*» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Ідентифікатор media: R30-03350 (рішення Нацради України з питань ТБ і РМ від 25.04.2024 р. № 1418).

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

ЗМІСТ

Комп'ютерні науки

<i>Л. П. Матійчук, О. П. Доренський, О. В. Шишацька, А. В. Шишацький, Я. І. Музичишин</i> Інтелектуальна система моніторингу дотримання правил паркування транспортних засобів	11-19
<i>Ю. І. Підлісний</i> Інтелектуально-контекстна модель класифікації середовищ інтернету речей	20-30
<i>М. Ф. Семенюта, С. М. Якименко, С. І. Осадчий</i> Оптимізація маршрутів безпілотних літальних апаратів для ефективного покриття заданої території.....	31-43
<i>О. С. Улічев, В. П. Кулагін</i> Оптимізація роботи мікросервісів на основі теорії ігор	44-57
<i>І. В. Шелехов, Д. В. Прилепа, Ю. О. Хібовська, К. Є. Шамонін, О. П. Доренський</i> Інформаційно-екстремальна технологія інтелектуального аналізу якості освітнього контенту в закладах вищої освіти.....	58-72

Комп'ютерна інженерія

<i>Т. О. Єфіменко, Л. Я. Мартинович</i> Синтез трійкового дворозрядного лічильника на базі трійкових Т-тригерів.....	73-79
<i>С. М. Лисенко, А. В. Качур</i> Інтегрована рамкова модель оцінки резильєнтності систем віртуальної реальності	80-89

Кібербезпека та захист інформації

<i>О. В. Лозинська, О. О. Марків, В. А. Висоцька</i> Виявлення джерел та учасників пропаганди в TikTok із використанням методів машинного навчання.....	90-98

Прикладна механіка

<i>А. Р. Апаракін, К. К. Щербина, А. М. Кириченко, В. А. Годорожа</i> Підвищення надійності кульково-гвинтового гідропідсилювача рульового управління із аксіальною структурою приводу	99-105
<i>І. Б. Гевко, Р. М. Рогатинський, А. Є. Дячун, Т. А. Довбуш, А. Д. Довбуш, А. Г. Никитюк</i> Синтез двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів	106-114

А. Є. Дячун, І. Б. Гевко, О. Ю. Стібайло, Р. Я. Лещук, Р. В. Комар
Теоретичне дослідження технологічного процесу оброблення зовнішньої
крайки гвинтових елементів сільськогосподарської техніки 115-125

Г. Б. Філімоніхін, Ю. О. Сокальська, Ю. О. Остапчук
Модернізація методу коефіцієнтів впливу для визначення динамічної
незрівноваженості жорсткого двохопрного ротора 126-132

Галузеве машинобудування

Е. Б. Алієв, І. М. Білоус
Симуляція процесу руйнування зерна ударним різанням 133-146

Е. Б. Алієв, О. А. Черній
Аналіз віброживильників для транспортування та дозування насіння
в системі їх автоматичного фенотипування 147-163

І. М. Бажан
Результати експериментального дослідження сепарації зерна на плоскому
коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів..... 164-174

О. В. Іванкова, В. О. Федін
Дослідження відновлення деталей шестеренних насосів пластичним
деформуванням 175-186

Р. В. Кісільов, П. Г. Лузан, В. В. Амосов, М. О. Васильковський
Дослідження впливу конструктивних параметрів змішувача на якість
приготування кормової суміші 187-194

В. В. Клименко, *Ю. А. Невдаха, О. В. Скрипник, С. В. Конончук, В. І. Кравченко*
Застосування шнекового методу пресування водовмісної композитної сировини
для виготовлення дослідно-промислової партії біопаливних пелет 195-205

Б. І. Котов, В. Г. Мироненко, С. П. Погорілий, В. О. Грищенко, Ю. І. Панцир
Аналіз процесів вібропневмосепарації зернових матеріалів з точки зору
завдань керування 206-216

*С. І. Криштопа, А. І. Сем'янчук, А. І. Добуш, Д. В. Копильців,
Р. М. Матвієнко, І. М. Солярчук*
Дослідження потенціалу рекуперації енергії відпрацьованих газів двигунів
технологічного транспорту 217-226

О. О. Матвієнко, В. В. Аулін, А. В. Гриньків
Стан та напрями розвитку архітектури даних для інтелектуальної оцінки
технічного стану мобільних машин агропромислового виробництва..... 227-237

І. М. Микитій
Експериментальні дослідження підвищення енергозбереження силових
приводів при переведенні на газоподібні продукти конвертації метанолу 238-244

<i>Д. С. Недельський, Д. І. Петренко, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський</i> Мехатронний аналіз роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей	245-252
<i>О. І. Фількін, А. М. Тригуба</i> Цифровий двійник кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки	253-264
<i>С. О. Харченко, О. І. Біловод, Ф. М. Харченко, А. М. Стельмах, В. В. Тіманов, А. І. Чигрин</i> Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь	265-271
<i>В. М. Чумак, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, С. В. Лисенко, О. В. Кузик</i> Підвищення зносостійкості та надійності деталей транспортної та сільськогосподарської техніки методами інжинірингу із застосуванням нейронних мереж	272-288
<i>В. В. Яцун, С. О. Джирма, О. О. Руденко</i> Огляд конструкцій гумових футеровок барабаних кульових млинів та перспективи їх розвитку	289-298
<i>В. В. Яцун, І. О. Скриннік, Г. Д. Портнов, О. В. Горпинченко</i> Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу у вібраційно-пневмотранспортній машині циклічної дії	299-307
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка	
<i>П. Г. Плешков, В. П. Солдатенко, В. В. Зінзура, О. І. Сіріков, С. П. Плешков</i> Оптимальне керування рівнем генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії	308-315
Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології	
<i>О. О. Бойко, Є. К. Воскобойник, Є. В. Кошеленко</i> Дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку з використанням децентралізованої системи.....	316-325
<i>С. Г. Ковальов, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, Ю. Г. Ковальов</i> Особливості побудови програмної симуляції для оптимізації ефективності використання та надійності експлуатації автоматизованих виробничих ліній	326-332
<i>Г. О. Корогод, Н. В. Чупринка, А. М. Кириченко</i> Комп'ютерне моделювання впливу надлишковості на точність визначення параметрів логарифмічної функції перетворення сенсора	333-341
<i>В. В. Смірнов, Н. В. Смірнова</i> Дослідження технічних характеристик бездротової мережі Easy Net Everywhere	342-349

Будівництво та цивільна інженерія

С. В. Біда, О. В. Петраш, Р. В. Петраш

Ефективність армування ґрунтоцементних елементів, влаштованих за бурозмішувальною технологією 350-357

А. С. Лапченко

Порівняння властивостей дорожнього цементобетону з додаванням поліпропіленових та базальтових фібр 358-365

В. А. Пашинський, М. В. Пашинський

Сполучення навантажень на покрівлі виробничих і цивільних будівель 366-374

Автомобільний транспорт

А. В. Йовченко

Підвищення енергоефективності, екологічності та енергетичної незалежності автотранспортних підприємств 375-382

Д. О. Шалапко, Я. І. Тарандушка

Оцінка впливу водневих добавок на довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння 383-391

І. А. Шльончак, М. П. Рудь

Можливі прогресивні методи переробки автомобільних шин 392-399

Транспортні технології (за видами)

А. А. Кочина, С. М. Неронов

Визначення та оцінка попиту на разові замовлення на ринку транспортних послуг у міжміському сполученні 400-409

Інформація про авторів 410-425

CONTENT

Computer Science

- Liubomyr Matiichuk, Oleksandr Dorenskyi, Olena Shyshatska, Andrii Shyshatskyy, Yaroslav Muzychyshyn*
Intelligent System for Monitoring Compliance with Vehicle Parking Regulations 11-19
- Yuriy Pidlisnyi*
Intelligent-Contextual Model for the Classification of Internet of Things Environments 20-30
- Maryna Semeniuta, Serhii Yakymenko, Serhii Osadchy*
Optimal Route Planning of Unmanned Aerial Vehicles for Efficient Coverage of a Given Area 31-43
- Oleksandr Ulichev, Victor Kulahin*
Game-Theoretic Approach to Microservice Optimization 44-57
- Igor Shelehev, Dmytro Prylepa, Yuliia Khibovska, Kiril Shamonin, Oleksandr Dorenskyi*
Information-Extreme Technology of Intelligent Analysis of Educational Content Quality in Higher Education Institutions 58-72

Computer Engineering

- Timur Yefimenko, Larysa Martynovych*
Synthesis of a Ternary Two-Bit Counter Based on Ternary T-Triggers 73-79
- Sergii Lysenko, Artem Kachur*
An Integral Resilience Evaluation Framework for Virtual Reality Systems 80-89

Cybersecurity and Information Protection

- Olga Lozynska, Oksana Markiv, Victoria Vysotska*
Identifying Sources and Participants of Propaganda in TikTok Using Machine Learning 90-98

Applied Mechanics

- Anton Aparakin, Kyryl Shcherbyna, Andriy Kyrychenko, Viktor Hodorozha*
Increasing the Reliability of the Ball-Screw Hydraulic Power Steering with an Axial Drive Structure 99-105
- Ivan Hevko, Roman Rohatynskyi, Andrii Diachun, Taras Dovbush, Anatolii Dovbush, Andrii Nykytiuk*
Synthesis of Twin-Shaft Screw Conveyor Mixers 106-114

Andrii Diachun, Ivan Hevko, Oleg Stibailo, Roman Leshchuk, Roman Komar
Theoretical Study of the Technological Process of Machining the Outer Edge
of Screw Elements of Agricultural Machinery 115-125

Gennadiy Filimonikhin, Yuliia Sokalska, Yuliia Ostapchuk
Modernization of the Influence Coefficient Method for Determining
the Dynamic Unbalance of a Rigid Two-Support Rotor 126-132

Industrial Machinery Engineering

Elchyn Aliiev, Illia Bilous
Simulation of the Grain Destruction Process by Impact Cutting 133-146

Elchyn Aliiev, Olexandr Chernii
Analysis of Vibrating Feeders for Transporting and Dosing Seeds in the System
of Their Automatic Phenotyping 147-163

Ihor Bazhan
Results of the Experimental Study on Grain Separation Using a Flat Oscillating
Sieve with Zigzag-Shaped Hole Arrangement 164-174

Olena Ivankova, Vitalii Fedin
Research on the Restoration of Gear Pump Parts by Plastic Deformation 175-186

Ruslan Kisilyov, Petro Luzan, Volodymyr Amosov, Mykhailo Vasylovskyi
Research on the Influence of Mixer Design Parameters on the Quality
of Feed Mixture Preparation 187-194

*Vasyl Klymenko, Yurii Nevdakha, Oleksandr Skrypnyk,
Sergiy Kononchuk, Volodymyr Kravchenko*
Application of the Screw Method of Pressing Water-Containing Composite Raw
Materials for the Manufacture of a Pilot Batch of Composite Biofuel Pellets 195-205

*Borys Kotov, Valentyn Myronenko, Serhii Pohorylyi,
Volodymyr Hryshchenko, Yurii Pantsyr*
Analysis of Vibro-Pneumatic Separation Processes of Grain Materials
in the Context of Control Objectives 206-216

*Sviatoslav Kryshchtopa, Andriy Semianchuk, Andriy Dobush,
Dmytro Kopyltsiv, Roman Matviienko, Ivan Solyarchuk*
Research into the Potential for Energy Recovery from Exhaust Gases
from Technological Transport Engines 217-226

Oleksandr Matviienko, Viktor Aulin, Andriy Grynkiv
Status and Development Directions of Data Architecture for Intelligent Assessment
of the Technical Condition of Mobile Machines of Agro-Industrial Enterprises 227-237

Ivan Mykytii

Experimental Studies on Increasing Energy Saving of Power Drives During
Their Conversion to Gaseous Products of Methanol Conversion.....238-244

Dmytro Nedelsky, Dmytro Petrenko, Serhii Leshchenko, Oleksii Vasylykovsky

Mechatronic Analysis of the Operation of a Pneumogravity Separator
for Grain Mixtures 245-252

Orest Filkin, Anatoliy Tryhuba

Digital Twin of a Cyber-Physical System for Washing Agricultural Machinery 253-264

Serhii Kharchenko, Oleksandra Bilovod, Farida Kharchenko,

Andrii Stelmakh, Volodymyr Timanov, Anton Chyhryn

Methods for Determining the Reliability Indicators of Corrugated
Perforated Sifting Surfaces 265-271

Vitaliy Chumak, Viktor Aulin, Andrii Grynkyv, Serhii Lysenko, Oleksandr Kuzyk

Increasing the Wear Resistance and Reliability of Resource-Determining
Parts of Transport and Agricultural Machinery by Engineering Methods
Using Neural Networks 272-288

Volodymyr Yatsun, Stanislav Dzhyrma, Oleksandr Rudenko

Overview of the Rubber Linings Designs of Drum Ball Mills and Further
Prospects for Their Development.....289-298

Volodymyr Yatsun, Ivan Skrynnik, Gennadiy Portnov, Olha Horpynchenko

Study of the Mechanics of the Movement of Loose Lumpy Material
in the Loading Zone on the Vibration-Acceleration Section of the Vibration
Pneumatic Transport Machine of Cyclic Action.....299-307

Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics

Petro Plieshkov, Valentyn Soldatenko, Vasyl Zinzura,

Oleksandr Sirikov, Serhii Plieshkov

Optimal Control of Active Power Generation Levels by Renewable
Energy Plants 308-315

Automation and Computer Integrated Technologies

Oleg Boyko, Yevhen Voskoboinyk, Yevhenii Koshelenko

Study of the Process of the Control of the Thermal Comfort in a Building
with Several Rooms Under the Conditions of Limited Energy Supply 316-325

Serhii Kovalov, Viktor Aulin, Andrii Grynkyv, Yurii Kovalov

Features of Building Software Simulation to Optimize the Efficiency
and Reliability of Automated Production Lines Using AI Methods.....326-332

Hanna Korohod, Nataliia Chuprynka, Anton Kyrychenko

Computer Modeling of the Impact of Redundancy on the Accuracy of Determining
the Current Parameters of the Sensor Logarithmic Transformation Function..... 333-341

Volodymyr Smirnov, Nataliia Smirnova

Research of Technical Characteristics of the Easy Net Everywhere Wireless Network 342-349

Construction and Civil Engineering

Serhii Bida, Oleksandr Petrash, Ruslan Petrash

Reinforcement Efficiency of Soil-Cement Elements Manufactured
by Deep Soil Mixing Technology 350-357

Artem Lapchenko

Comparison of Road Cement Concrete Properties with Polypropylene
and Basalt Fibers Addition..... 358-365

Victor Pashynskiy, Mykola Pashynskiy

Combination of Loads on Roofs of Industrial and Civil Buildings 366-374

Road Transport

Alla Yovchenko

Integration of Solar Energy Systems into Motor Transport
Enterprises to Ensure Energy Autonomy, Energy Efficiency
and Environmental Friendliness..... 375-382

Denys Shalapko, Yan Tarandushka

Assessment of Hydrogen Additives Impact on the Durability and Reliability
of Internal Combustion Engines..... 383-391

Ihor Shlonchak, Maksym Rud

Possible Progressive Ways of Recycling Car Tires 392-399

Transport Technologies (by Types)

Anastasia Kochina, Serhii Neronov

Identification and Assessment of Demand for One-Off Orders in the Intercity Transport
Services Market in Kyiv Region and Beyond..... 400-409

Information About Authors 410-425

UDC 004.89:004.7:656.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.11-19](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.11-19)

Liubomyr Matiichuk¹, Assoc. Prof., DSc., **Oleksandr Dorenskyi**², Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Shyshatska**³, PhD phys. and math. sci., **Andrii Shyshatskyi**³, **Yaroslav Muzychyshyn**¹

¹*Ternopil Ivan Pulyuj National Technical University, Ternopil, Ukraine,*

²*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

³*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

e-mail: mlpstat@gmail.com, dorenskyiop@kntu.kr.ua, shyshatska@knu.ua

Intelligent System for Monitoring Compliance with Vehicle Parking Regulations

This study is dedicated to the development of an intelligent system for monitoring compliance with parking regulations using neural networks. The objective has been achieved through the synthesis of mathematical models of the technological process of intelligent parking monitoring, taking into account the technological aspects of vehicle detection with the YOLO model, as well as license plate localization and recognition. Based on this, a generalized model of the intelligent monitoring system and its architecture have been proposed. The results of experimental testing on real video recordings are presented, confirming the system's suitability for operation under varying lighting conditions, different viewing angles, and video quality. The chosen data collection strategy 'one frame per minute' ensures a balance between monitoring accuracy and computational efficiency, making the system scalable and effective for integration into intelligent parking management systems.

neural networks, YOLO model, EasyOCR framework, automated parking compliance control, intelligent monitoring, license plate recognition

Problem Statement. In most Ukrainian cities, automated video surveillance systems have been implemented; however, these systems generally lack built-in functions of intelligent analysis for monitoring compliance with parking regulations. Even those systems that are capable of license plate recognition or motion detection account for parking violations only in a limited way, particularly in the context of non-payment for the use of parking spaces or the legally regulated duration of vehicle presence within the control zone. This problem remains unresolved to date, which makes it reasonable and necessary to introduce an intelligent system for monitoring compliance with parking regulations.

To effectively address this problem, it is necessary to employ artificial intelligence methods, particularly deep neural networks. The use of neural networks enables high-accuracy object classification and provides solutions to computer vision tasks. The proposed approach makes it possible to implement automated monitoring of compliance with parking regulations, reducing time and financial costs while increasing the overall efficiency of parking zone management. This approach is highly promising within the framework of the Smart City concept.

Analysis of Recent Research and Publications. Previously, classical computer vision methods were widely used for license plate identification, in particular threshold segmentation and contour analysis. Threshold segmentation made it possible to extract license plates based on color contrast; however, it was overly sensitive to changes in lighting conditions [1]. Contour analysis detected rectangular objects but often mistakenly included

extraneous elements [2]. The main drawbacks of such methods are their instability under variations in brightness, viewing angle, and image quality, which significantly reduces recognition accuracy. In addition, they require considerable hardware resources, since processing is performed across the entire frame. As noted in the work of Anagnostopoulos et al. [3], traditional methods yield acceptable results under laboratory conditions but lose effectiveness in real-world environments.

In this context, methods based on convolutional neural networks (CNNs) have gained popularity, demonstrating high accuracy and adaptability to complex imaging conditions [4]. In particular, the YOLO algorithm enables precise localization of license plates even under variations in lighting and viewing angles. A stepwise approach is considered optimal: first detecting the license plate region, followed by the application of an OCR algorithm for character recognition, which reduces computational costs. In Yakovlev's work, the YOLOv5 model was used for detection and EasyOCR for recognition, achieving an accuracy of 95.57% on a dataset of 20,000 images [1]. In the study by Podorozhniak et al., the use of Mask R-CNN was proposed, which transforms distorted regions into rectangular ones, thereby increasing recognition accuracy to 96% at camera angles up to 63° [5].

Other researchers have also made significant contributions to the development of license plate recognition systems. Vysotskyi and Yavorskyi adapted the YOLO model to Ukrainian license plates based on the AutoRia dataset, and applied EasyOCR for OCR, though they noted its instability under poor lighting conditions [6]. In the work of Vakalyuk et al., classical methods were compared, including the Viola–Jones algorithm for plate detection and SVM for character classification. The Viola–Jones method provides high processing speed, but its accuracy decreases when the plate tilt exceeds 30°, whereas SVM effectively separates character classes by maximizing the margin between them [7].

Scientific research works [8–11] have also reported theoretical and practical results concerning the digitalization of business processes across various industries. In particular, these studies examined and presented the results of applying artificial intelligence technologies for the digital transformation of different areas of human activity, demonstrating both the efficiency and feasibility of AI adoption. For instance, in [11] an adaptive model of investor surveys was developed, employing modern machine learning methods to form a detailed continuous risk profile. In this way, the authors ensured higher accuracy and personalization of risk profiling compared to traditional methods, while the integration of adaptive question selection with advanced machine learning techniques optimized the business process.

Therefore, modern neural network approaches demonstrate significantly higher accuracy, stability, and suitability for integration into intelligent systems for monitoring compliance with parking regulations.

Problem Definition. The purpose of this study is to develop an intelligent system for monitoring compliance with parking regulations using neural networks, based on video footage from surveillance cameras located near parking zones. To achieve this objective, the following tasks must be addressed:

1. Mathematical formalization of the technological process of intelligent monitoring of compliance with parking regulations, taking into account the following technological aspects: vehicle detection using the YOLO (You Only Look Once) model, enabling fast and accurate object identification within a frame; license plate localization and recognition, implemented through a combined approach involving YOLO for license plate region detection and EasyOCR for subsequent text recognition; verification of parking fee payment as a key system component, performed by querying the relevant database or API containing payment status information linked to the license plate.

2. Synthesis of a generalized model of the intelligent monitoring system in accordance with the proposed mathematical models of the technological process of intelligent parking regulation monitoring.

3. Development of the system architecture for the intelligent monitoring system, considering the technological aspects of real-world operating conditions.

4. Experimental evaluation of the intelligent system, representative of real-world conditions and typical parking scenarios, including partial object occlusion, variable lighting, and diverse license plate types.

Main Results. In the problem statement, it was defined that the process of intelligent monitoring of compliance with parking regulations must include the following components:

- vehicle detection performed using the YOLO model,
- license plate localization and recognition,
- verification of parking fee payment.

It is also established that the operating conditions of the intelligent system involve typical parking scenarios, including partial object occlusion, variable lighting, and diverse license plate types.

Mathematical formalization of the technological process. Let the set of cameras be denoted as $C = \{1, \dots, C\}$, with the time axis discretized by a step of $\Delta(c)$, $\Delta = 60$ c in the baseline configuration. For a camera $c \in C$ at time $t_k = t_0 + k\Delta$ a frame $x_{c,k} \in \chi \subset \mathbb{R}^{H \times W \times 3}$ is observed. This “1 frame per minute” policy is chosen to reduce computational load and data storage requirements, while still maintaining suitability for detecting changes in the parking lot.

Let Z denote the set of parking zone identifiers, and let $z(c) \in Z$ represent the zone monitored by camera c .

For vehicle (V) detection, each frame is processed by an object detector:

$$f_{veh}: \chi \rightarrow \mathcal{B}_{veh}, \quad \mathcal{B}_{veh} = \{(b_i, s_i)\}_{i=1}^{N_{veh}},$$

where $b_i \in \mathbb{R}^4$ represents the bounding box and $s_i \in [0,1]$ denotes the confidence score. A YOLO family model with pre-trained weights is employed. Detections with $s_i \geq \tau_{veh}$ (typically $\tau_{veh} = 0.5$).

License plate detection of vehicles: for each detected vehicle, a subtask is defined as

$$f_{lp}: \chi \times \mathcal{B}_{veh} \rightarrow \mathcal{B}_{lp}, \quad \mathcal{B}_{lp} = \{(\ell_i, r_i)\}_{i=1}^{N_{lp}},$$

where $\ell_i \subset b_i$ denotes the bounding box of the vehicle's license plate, and $r_i \in [0,1]$ represents the confidence score. Only $\ell_i \subseteq b_i$ that satisfy geometric constraints (aspect ratio, minimum area, orientation) are retained, while false positives are discarded.

The relationship “license plate belongs to vehicle” is formalized as an optimization problem of maximizing the overlap:

$$assign(\ell) = \arg \max_{b \in \mathcal{B}_{veh}} IoU(\ell, b) \quad \text{subject to } IoU(\ell, b) \geq \gamma,$$

where IoU denotes the intersection-over-union coefficient, with $\gamma \in (0,1)$.

OCR and license plate text normalization: for each license plate region, optical character recognition is applied:

$$f_{ocr}: \chi \times \mathcal{B}_{lp} \rightarrow (y, q),$$

where $y = (y_1, \dots, y_m)$ is the sequence of recognized characters, and $q = (q_1, \dots, q_m)$ are the confidence scores of the characters.

After OCR, a normalizer $\pi(\cdot)$ is applied (regular expressions, alphabet constraints, country-specific templates), which returns the canonical license plate number $p \in \mathcal{P}$. The result is accepted if

$$\bar{q} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_i \geq \tau_{ocr}.$$

Detection of “arrival” and “presence” of a vehicle: for a license plate p in zone z , we define the temporal set of occurrences

$$\mathcal{T}_{p,z} = \{t_k: \exists c: z(c) = z, p \text{ recognised on } x_{c,k}\}.$$

Estimation of the Vehicle Arrival Time at the Parking Lot

$$t_{p,z}^{in} = \min \mathcal{T}_{p,z},$$

and the moment of the last observation

$$t_{p,z}^{last} = \max \mathcal{T}_{p,z}.$$

Mathematical Model of Payment and Grace Period: let the payment database be defined as the set of intervals

$$\mathcal{R} = \{(p, z, [a, b], is_{paid})\}.$$

According to the policy, a grace period of $\delta = 15$ minutes is applied after arrival. A payment is considered valid if $\exists (p, z, [a, b], is_{paid} = true)$ such that the control time moment t is covered:

$$t \in [a, b] \text{ or } [a, b] \cap [t_{p,z}^{in}, t_{p,z}^{in} + \delta] \neq \emptyset.$$

In the absence of coverage after the expiration of the grace period, a violation event is generated.

Decision rule and event generation: let us define the decision

$$d(p, z, t) = \begin{cases} OK, \exists \text{ payment that covers } t \\ VIOL, t \geq t_{p,z}^{in} + \delta \wedge \neg \exists \text{ payment that covers } t \end{cases}$$

Violation event:

$$e = (p, z, t, c, URI(x_{c,k}), meta),$$

where $URI(x_{c,k})$ – a reference to the evidence frame, $meta$ – service attributes (bounding box coordinates, confidence scores, inspection module identifier).

System quality: for a violation that has occurred, the a priori estimate of full recall is:

$$R_{e2e} \approx R_{veh} \cdot R_{lp} \cdot R_{ocr} \cdot R_{sampl}(\Delta, \delta),$$

where R_{veh} is the recall of the vehicle detector at threshold τ_{veh} ; R_{pl} is the recall of the license plate detector (conditional: given a detected vehicle); R_{ocr} is the probability of correct license plate recognition, given correct localization; $R_{sampl}(\Delta, \delta)$ is the probability that the system captures a frame after the expiration of the grace period (determined by the sampling policy and the distribution of parking duration).

Sampling model. Assume that the arrival moment is uniformly distributed with respect to the grid $\Delta: U \sim Unif(0, \Delta)$. Let T_{dwell} - denote the random parking duration. Then

$$R_{sampl}(\Delta, \delta) = \mathbb{P}(T_{dwell} \geq \delta + U) = \frac{1}{\Delta} \int_0^\Delta \mathbb{P}(T_{dwell} \geq \delta + u) du /$$

If $\mathbb{P}(T_{dwell} \geq \delta + \Delta)$ is high, then R_{sampl} approaches 1. This formalizes the statement regarding the sufficiency of $\Delta = 60$ s for parking lots with slow dynamics.

Geometric and logical constraints. License plate geometry: for ℓ the following holds: $a_{min} \leq \frac{width(\ell)}{height(\ell)} \leq a_{max}$ ta $area(\ell) \geq A_{min}$. Duplicates: for the set of license plates associated with a single b_i , we apply NMS in the space of texts/geometry; we select $\ell^* = \arg \max_{\ell} (r_{\ell} \cdot \bar{q}_{\ell})$.

False license plate filtering: candidates with $IoU(\ell, b) < \gamma$ or those not matching the template $\pi(y)$ are discarded.

Integration model of payment access: payment verification is defined as a Boolean function

$$g(p, z, t) = 1(\exists (p, z, [a, b], true) s.t. t \in [a, b] \vee [a, b] \cap [t_{p,z}^{in}, t_{p,z}^{in} + \delta] \neq \emptyset),$$

is invoked at the decision-making stage $d(p, z, t)$. In the case of $g = 0$ для $t \geq t_{p,z}^{in} + \delta$, a penalty event is generated and sent to the inspection module.

Using the entire video stream in real-time mode is not advisable; capturing one frame per minute is sufficient. The proposed data collection strategy - one frame per minute - reduces the computational load and ensures scalability of the solution for large parking areas. This approach significantly decreases the volume of data to be stored compared to continuous video streaming, thereby reducing server load, simplifying database integration, and optimizing computational resources. Processing a single frame per minute is adequate for detecting and identifying vehicles, as well as recognizing their license plates in the context of parking lots, where changes occur relatively infrequently. This reduces computational overhead and makes it possible to employ more accurate algorithms, such as Faster R-CNN, without loss of performance.

Methodology of Generalized Model and System Architecture Synthesis. After receiving a frame, the system proceeds to the object detection stage, where all vehicles present in the image are identified. Preliminary image processing of vehicles is performed using the YOLO object detection algorithm. The model is loaded with pre-trained weights (on the COCO dataset), and for each image an analysis is performed to obtain the coordinates of the objects (bounding boxes) where the vehicles are located, as well as their confidence scores. Further filtering retains only those objects whose detection confidence exceeds the established threshold (≥ 0.5). Figures 2 and 3 illustrate the highlighted areas around each vehicle and its license plate.

The next step is the filtering of detected license plates, during which the system matches the identified regions with the positions of vehicles. This filtering eliminates false detections, such as text elements or other objects that may mistakenly be identified as license plates. The resulting image files (Figures 1 and 2) are stored in a local directory for subsequent processing.

The subsequent stage involves image preprocessing, aimed at preparing the data for effective recognition. Through color normalization procedures, images are converted into the appropriate color space - RGB, to preserve color information, or Grayscale, to simplify computations. Scaling to a standardized size (e.g., 640×480 pixels) reduces computational costs and ensures a unified input for the neural network.

To minimize noise and improve image quality, smoothing filters are applied, such as Gaussian Blur or Median Filter, which preserve object contours and enhance the accuracy of subsequent license plate detection.

The next step is the detection and localization of license plates. Within each vehicle bounding box, smaller candidate regions potentially containing license plates are searched using a specialized YOLO detection model. The results are further filtered to discard regions that do not correspond to the geometric characteristics of license plates.

After the license plates are localized on the extracted images, optical character recognition (OCR) is applied using the EasyOCR library. The results, subsequently stored in the database, enable automation of the parking payment control process.

Verification of parking payment is one of the key components of the system. According to the current regulations, the driver is granted a grace period of approximately 15 minutes to complete payment after arrival is recorded. If payment is not made within this period, the system automatically generates a violation event, which is sent to the inspection module. Such an event contains the vehicle's license plate number, a photographic record of the violation, and the detection timestamp, enabling inspectors to respond promptly to the situation.

As an illustrative example, consider the operation of the payment component of the intelligent parking monitoring system. The system sends a query containing verification parameters and invokes a system function (Figures 4 and 5) against the database to check the payment status of a specific vehicle. If the database contains a record showing that the vehicle with license plate VO9916ET has paid for parking at PARK123, and the violation time 15:30 falls within the interval 14:00–16:00, the function will return True. If the record is absent or is `_paid = False`, the system will call `send_fine_event(...)` and return False.

The generalized model diagram of the intelligent parking monitoring system is presented in Figure 1. Overall, this model encompasses data collection, processing, storage, transmission, and analysis.

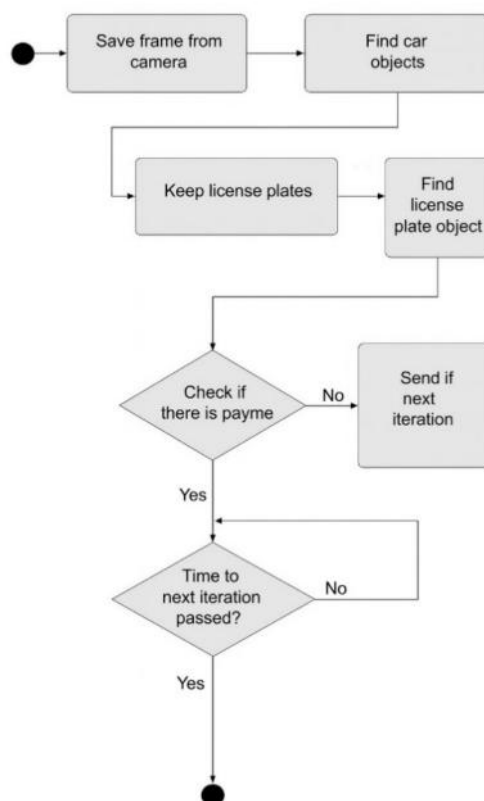


Figure 1 – Diagram of the generalized model of the intelligent system for monitoring compliance with parking regulations

Source: developed by the authors

Thus, the intelligent system consists of the following functional modules: Save frame from camera, Detect car objects, Detect license-plate objects, Keep plates that lie within car objects, Recognize plate number, Check if payment exists, Send violation event. The software component of the intelligent system was implemented using the Python programming language.

The approach chosen by the authors automates the control process, eliminating the need for manual inspection of parking areas. Inspectors receive targeted notifications only for cases requiring intervention, which significantly improves operational efficiency and allows optimizing control service resources.

Experimental results. For the experiment, frames were selected from surveillance cameras at a parking lot located at: 12 Taras Shevchenko Boulevard, Ternopil (Fig. 2), and 21 Ruska Street, Ternopil (Fig. 3). The selected images contain several vehicles positioned at

different viewing angles and distances from the camera, enabling the evaluation of the recognition algorithms' robustness to perspective and scale variations.



Figure 2 – Frame from a surveillance camera installed at the parking lot, 12 Taras Shevchenko Boulevard, Ternopil

Source: developed by the authors



Figure 3 – Frame from a surveillance camera installed at the parking lot, 21 Ruska Street, Ternopil

Source: developed by the authors

Such an environment is representative of real operating conditions of the system, as it includes typical parking scenarios, in particular partial object occlusion, variable lighting, and diverse types of license plates. This ensures sufficient variability of data for testing the accuracy and reliability of the proposed methods.

Conclusions. As a result of the research, an intelligent system for monitoring compliance with parking regulations using neural networks based on video footage from surveillance cameras located near parking zones has been proposed. The main outcomes are as follows:

1. A mathematical formalization of the technological process of intelligent monitoring of compliance with parking regulations has been carried out, taking into account such technological aspects as vehicle detection using the YOLO model.

2. A generalized model of the intelligent system has been developed, which enables fast and accurate object detection within a frame, provides license plate localization and recognition (implemented through the combined use of YOLO for extracting the license plate region and EasyOCR for subsequent text recognition), and incorporates parking payment verification (payment status linked to the license plate).

3. The architecture of the intelligent system has been synthesized, considering the technological aspects of real-world operating conditions.

4. An experimental study of the developed intelligent system has been conducted, representative of real operating conditions, taking into account typical parking scenarios, including partial object occlusion, variable lighting, and diverse license plate types.

As a result of the conducted research, an intelligent system has been developed that allows effective control of parking payments. As demonstrated in the paper, the chosen data collection strategy of “one frame per minute” reduces the computational load and ensures scalability of the solution for large parking areas.

The system is based on modern computer vision algorithms - YOLO for object detection and EasyOCR for character recognition. This ensures high accuracy in image processing under real-world conditions. The developed system demonstrated robustness to variations in lighting, viewing angle, and video quality. The designed parking payment verification component automatically detects violations, ensures precise recording with frame preservation, and transmits the data to the inspection module for further action.

List of References

1. Яковлев А. Застосування методу сегментації на основі моделей нейронних мереж для вирішення задач розпізнавання номерних знаків. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2024. Т. 1, № 44. DOI: 10.20535/1560-8956.44.2024.302420.
2. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 779–788.
3. Anagnostopoulos, C. N., Anagnostopoulos, I. E., Psoroulas, I. D., Loumos, V., Kayafas, E. License plate recognition from still images and video sequences: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2008. Vol. 9, № 3. P. 377–391.
4. Сватюк Д., Сватюк О., Белей О. Застосування згорткових нейронних мереж для безпеки розпізнавання об'єктів у відеопотоці. *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. 2020. № 4(8). DOI: 10.28925/2663-4023.2020.8.97112.
5. Подорожняк А. О., Любченко Н. Ю., Гейко Г. В. Нейромережева система розпізнавання автономера. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Вип. 4(62). DOI: 10.26906/SUNZ.2020.4.088.
6. Висоцький В., Яворський Н. Система розумного паркування для розпізнавання номерних знаків на основі нейромережі YOLO та оптичного розпізнавання символів. *Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика*. 2024. Вип. 6(3). DOI: 10.23939/cds2024.03.123.
7. Вакалюк Т. А., Власенко О. В., Василенко М. К. Аналіз методів розпізнавання номерних знаків. *Тези VI Всеукраїнської науково-технічної конференції*. Житомирська політехніка, 2023. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/01/19.pdf> (дата звернення: 06.06.2025).
8. Dorenskyi, O., Drobko, O., Drieiev, O. Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. 2. С. 3–10. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10.
9. Шелехов І.В., Прилепа Д.В., Хібовська Ю.О., Шамонін К.С., Доренський О.П. Інформаційно-екстремальна технологія інтелектуального аналізу якості освітнього контенту в закладах вищої освіти. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. 1. (Препринт Центральноукр. нац. техн. ун-т).
10. Kachurivskyi, V., Kotovskiy, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., Dorenskyi, O. The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 27–36. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36.
11. Korniienko O., Kozub N., Dorenskyi O. Method and Technological Solution of an AI-Based Adaptive Investor Survey Service for Determining an Individual Risk Profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 11(42), Part II. P. 3-10. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.3-10.

References

1. Yakovlev, A. (2024). Zastosuvannia metodu sehmentatsii na osnovi modelei neironnykh merezh dlia vyvishennia zadach rozpoznavannia nomernykh znakov. *Adaptivni systemy avtomatychnoho upravlinnia*, 1(44). <https://doi.org/10.20535/1560-8956.44.2024.302420>.
2. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788.
3. Anagnostopoulos, C. N., Anagnostopoulos, I. E., Psoroulas, I. D., Loumos, V., & Kayafas, E. (2008). License plate recognition from still images and video sequences: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(3), 377–391.
4. Svatiuk, D., Svatiuk, O., & Belei, O. (2020). Zastosuvannia zghortkovykh neironnykh merezh dlia bezpeky rozpoznavannia ob'ektiv u videopototsi. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 4(8). <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.8.97112>.
5. Podorozhniak, A. O., Liubchenko, N. Yu., & Heiko, H. V. (2020). Neiromerezheva systema rozpoznavannia avtonomera. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*, 4(62). <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.088>.
6. Vysotskyi, V., & Yavorskyi, N. (2024). Systema rozumnoho parkuvannia dlia rozpoznavannia nomernykh znakov na osnovi neiromerezhi YOLO ta optychnoho rozpoznavannia symvoliv. *Komp'uterni systemy proektuvannia. Teoriia i praktyka*, 6(3). <https://doi.org/10.23939/cds2024.03.123>.
7. Vakaliuk, T. A., Vlasenko, O. V., & Vasylenko, M. K. (2023). Analiz metodiv rozpoznavannia nomernykh znakov. *Tezy VI Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Zhytomyrska politekhnika*. Retrieved June 6, 2025, from <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/01/19.pdf>.
8. Dorenskyi, O., Drobko, O., & Drieiev, O. (2022). Improved model and software of the digital information service of the municipal health care institutions. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5(36), Part 2, 3–10. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10).
9. Shelekhov, I. V., Prilepa, D. V., Khibovska, Yu. O., Shamonin, K. Ye., & Dorenskyi, O. P. (2025). Informatsiino-ekstremalna tekhnolohiia intelektualnoho analizu yakosti osvithnoho kontentu v zakladakh vyshchoi osvity [Information-extreme technology of intelligent analysis of the quality of educational content in higher education institutions]. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences], (12(43), Part 1). Preprint, Central Ukrainian National Technical University.
10. Kachurivskyi, V., Kotovskyi, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., & Dorenskyi, O. (2025). The concept of digital transformation of monitoring scientific activity of participants in educational process of the Ukrainian HEI. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), Part I, 27–36. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36).
11. Korniienko, O., Kozub, N., & Dorenskyi, O. (2025). Method and technological solution of an AI-based adaptive investor survey service for determining an individual risk profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), Part II, 3–10. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.3-10).

Л. П. Матійчук¹, доц., док. екон. наук, О. П. Доренський², доц., канд. техн. наук,

О. В. Шишацька³, доц., канд. ф.-мат. наук, А. В. Шишацький³, Я. І. Музичишин¹

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

Інтелектуальна система моніторингу дотримання правил паркування транспортних засобів

Праця присвячена створенню інтелектуальної системи моніторингу за дотриманням правил паркування з використанням нейронних мереж в умовах змінного освітлення, різних кутів огляду та якості відеопотоку. Ця мета досягнута шляхом математичної формалізації технологічного процесу інтелектуального моніторингу за дотриманням правил паркування з урахуванням таких технологічних аспектів, як детекція транспортного засобу із використанням моделі YOLO (You Only Look Once), локалізація і розпізнавання номерного знаку за допомогою комбінованого поєднання алгоритмів YOLO та EasyOCR (перший забезпечує виокремлення області номерного знака, другий – розпізнавання), перевірка факту оплати паркування з «прив'язкою» до номерного знака транспортного засобу.

На основі математичних моделей побудовано узагальнену модель інтелектуальної системи моніторингу за дотриманням правил паркування, запропоновано архітектуру інтелектуальної системи з урахуванням технологічних аспектів реальних умов функціонування системи та її програмну реалізацію.

Представлені результати експериментального тестування запропонованої інтелектуальної системи на реальних відеозаписах підтвердили її придатність до функціонування в умовах змінного освітлення, різних кутів огляду, якості відеозапису. Обрана стратегія збору даних – один кадр за хвилину – забезпечує баланс між точністю моніторингу та економією обчислювальних ресурсів, що робить і-систему масштабованою, ефективною для впровадження в інтелектуальні системи управління паркувальним простором.

нейронні мережі, YOLO, EasyOCR, автоматизований контроль паркування, моніторинг, розпізнавання

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 09.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

UDC 004.42

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.20-30](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.20-30)**Yuriy Pidlisnyi***Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine**e-mail: ypodlesny@ukr.net*

Intelligent-Contextual Model for the Classification of Internet of Things Environments

This paper presents an intelligent-contextual model for classifying Internet of Things (IoT) environments, based on the comprehensive consideration of key parameters such as the level of embedded intelligence, operational context, security level, and system dynamics. The relevance of the study stems from the rapid growth in the complexity of IoT ecosystems, which are characterized by heterogeneous devices, diverse operating conditions, the need for adaptability to environmental changes, and increased security requirements. A critical analysis of existing IoT classification approaches reveals their major limitations: a narrow focus on purely technical or functional features, inadequate reflection of device behavior and intelligence, and the disregard for operational context and threat landscape.

The developed model addresses these shortcomings and enables more accurate structuring of IoT environments by taking into account their intended purpose, architectural characteristics, and ability to autonomously make decisions. It can be applied for system analysis, risk formalization, optimization of threat response mechanisms, and the design of effective cybersecurity strategies and adaptive control in dynamic environments. The proposed classification makes it possible to generalize existing IoT system types and lays the groundwork for developing new, more flexible and secure architectures. The practical significance of the results lies in their applicability across industries where intelligent data processing, contextual awareness, and resilience to cyberthreats are essential - including Industry 4.0, eHealth, intelligent transport systems, and smart cities.

Internet of Things, IoT classification, intelligent systems, security, usage context, system dynamics, adaptation, cybersecurity, intelligent-contextual model

Problem Statement. The rapid development of Internet of Things (IoT) technologies has led to the formation of an extremely diverse environment of devices, protocols, and usage scenarios. Current classification approaches, which are mostly based on the functional or technological grouping of IoT devices, often fail to consider their complexity, operating context, or potential threat levels. This complicates the development of effective management, monitoring, and cybersecurity systems in dynamic networks.

The aim of this study is to develop a new classification model for IoT environments that is based not only on functional characteristics but also incorporates the level of embedded intelligence, the degree of security, the architecture of interaction, and the application context of devices. This approach creates a foundation for the development of flexible methods for analyzing and securing dynamic IoT environments.

Analysis of Recent Studies and Publications. Despite the considerable number of studies in the field of the Internet of Things (IoT), existing classification approaches often remain limited to traditional technical frameworks. To justify the need for a new classification model, this section reviews key modern scientific works focused on intelligence, security, architecture, and the functional context of IoT.

One of the fundamental studies highlighting the influence of intelligent technologies on IoT development is [1], which provides a broad analysis of artificial intelligence methods used across various IoT subsystems. It emphasizes the importance of integrating machine learning, neural networks, and data processing into modern IoT architectures. IoT security issues are addressed in [2], where the authors stress the need to consider threat levels and operational context when designing secure systems - particularly for critical infrastructure.

Regarding IoT architecture, [3] analyzes centralized and decentralized approaches in the medical domain, illustrating the significance of architectural choices based on application context. The relevance of dynamics and device mobility is highlighted in [4], which identifies mobility, scalability, and adaptability as key characteristics of modern IoT systems.

The conducted literature review confirms the necessity of a new classification approach that reflects the multidimensional features and challenges of contemporary IoT environments.

Research Objective. To develop a new classification model for IoT environments that goes beyond functional and technical parameters and takes into account adaptivity, security requirements, interaction architecture, and usage context. This model is intended to provide a holistic systemic view for making managerial and cybersecurity decisions in dynamic IoT networks.

Main Content. To achieve the goal of developing an intelligent-contextual classification model for Internet of Things (IoT) environments, the following research tasks were formulated and consistently implemented throughout the main body of the article:

1. Analyze current approaches to IoT system classification and identify their limitations under modern challenges.
2. Define relevant classification criteria, including intelligence level, security level, interaction architecture, operating context, and system dynamics.
3. Develop a conceptual model of intelligent-contextual classification based on the defined criteria.
4. Construct a classification block diagram that formalizes the model structure and demonstrates its applicability.
5. Evaluate the effectiveness of the proposed model compared to traditional approaches, focusing on adaptivity, security, and practical value.

Task 1: Analysis of current classification approaches and identification of their limitations.

The current IoT environment is characterized by extreme diversity in devices, architectural solutions, and application scenarios. Traditional classification methods typically focus on device types, industry-specific applications, or communication protocols [5–6]. However, such approaches fail to consider the increasing importance of device intelligence, security levels, usage context, and behavioral dynamics.

Thus, existing classification models are found to be fragmented and insufficiently adaptive, confirming the need for a new classification framework.

Task 2: Identification of relevant classification criteria.

Given the shortcomings of traditional classification methods, there is a need to establish new criteria that can adequately describe the complexity, flexibility, and risks inherent to modern IoT systems. Based on the literature analysis [5–6] and typical operation scenarios, five relevant classification criteria have been identified:

- a) *Level of embedded intelligence* – the device’s ability to process information autonomously, learn, or make decisions;
- b) *Security level* – the presence of authentication mechanisms, encryption, anomaly detection;
- c) *Interaction architecture* – centralized, decentralized, or hybrid system structure;
- d) *Operational context* – the application domain (industry, household, healthcare, transport, etc.) that defines risks and reliability requirements;
- e) *System dynamics* – the ability to modify topology, routing, or functionality in real time.

Task 3: Development of a conceptual intelligent-contextual classification model.

Based on the defined criteria, a conceptual model of intelligent-contextual classification for IoT environments was developed. Its core idea is to combine technical (intelligence, architecture, security) and contextual (application domain, system dynamics) characteristics to provide a more accurate representation of device behavior and roles within IoT systems.

The model functions as a multidimensional classification system where each IoT device or subsystem is positioned according to five coordinates aligned with the classification criteria. For practical use, the model is formalized as the following function (1):

$$C: D \rightarrow I \times S \times A \times C_x \times D_\gamma \quad (1)$$

where:

C - classification function;

D - the set of IoT devices or subsystems;

I - level of embedded intelligence (0 – none, 1 – basic, 2 – high);

S - security level (low, medium, high);

A - interaction architecture (centralized, decentralized, hybrid);

C_x - operational context (home, industrial, transport, medical, etc.);

D_γ - system dynamics (static, mobile, swarm/dynamic).

Task 4: Construction of the classification block diagram.

To facilitate the implementation of the proposed model in decision support systems, a block diagram of IoT classification was developed (Figure 1). It formalizes the logic of classification based on the five previously defined dimensions.

At the top level, the diagram presents the general concept of an "IoT system," which is further divided into five classification dimensions. Each dimension includes examples of characteristics related to the corresponding criterion:

a) *Intelligence level* – from local data analysis to machine learning and autonomous adaptation;

b) *Security level* – authentication, encryption, resistance to cyberattacks;

c) *Interaction architecture* – centralized, decentralized, hybrid;

d) *Operational context* – urban, industrial, medical environments, etc.;

e) *Dynamics* – adaptive topology, reconfiguration, scalability.

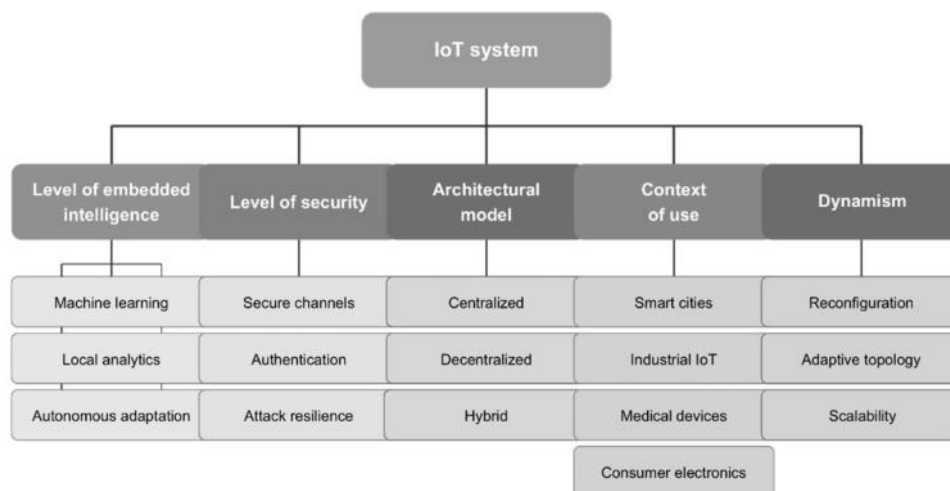


Figure 1 - Block diagram of the intelligent-contextual classification model of the Internet of Things

Source: Developed by the author

Detailed consideration of each criterion and their role in building the new classification model:

1. Level of embedded intelligence in IoT systems:

With the growing adoption of edge AI (artificial intelligence operating directly on the device) and federated learning (distributed training of models on multiple devices without transmitting data to a central server), IoT devices increasingly gain the capability to independently process data, make decisions, and even learn in real time [7]. This significantly

reduces data processing latency, lowers network load, and enhances device autonomy. Classifying IoT systems by their level of embedded intelligence allows the identification of:

- a) *Passive systems: collect and transmit data without local processing;*
- b) *Analytical systems: local data processing and basic decision-making;*
- c) *Adaptive systems: self-learning and functional optimization based on experience.*

2. Security level of IoT systems:

Information security remains a major challenge in IoT development. Depending on the level of protection, systems can be classified as:

- a) *Open systems: minimal authentication and encryption mechanisms;*
- b) *Basic secure systems: use of standard security protocols such as TLS/SSL;*
- c) *Highly secure systems: implementation of advanced protection mechanisms, including anomaly monitoring and security neuroagents.*

The presence or absence of secure communication channels, as well as authentication and authorization policies, directly affects the system's resistance to attacks [8].

3. Architectural Structure of IoT Systems:

The architecture of an IoT system determines how data is processed and how devices interact. Based on this, systems can be divided into:

- a) *Centralized: data is sent to a single processing center (cloud);*
- b) *Decentralized: data is processed locally or via peer-to-peer interaction;*
- c) *Hybrid: combines local processing with centralized analysis.*

This classification helps to better understand the various organizational approaches in IoT systems, which can be tailored to specific application requirements. The importance of architecture in defining protection methods and ensuring system stability has also been emphasized in studies [9], which note that the choice between centralized and decentralized systems depends on the network characteristics and data processing needs.

4. Operational Context of IoT Systems:

Understanding the context in which a system operates is critical for selecting the right security strategy and optimization methods. Systems can operate in various environments:

- a) *Critical infrastructure (e.g., energy, transportation);*
- b) *Smart cities (e.g., smart homes, streets, parking systems);*
- c) *Home IoT (e.g., smart speakers, thermostats);*
- d) *Wearable devices (e.g., health monitoring sensors).*

The operational context is a vital component of the intelligent-contextual classification model, as it defines system-specific requirements based on function and environment. As noted in [10], for critical infrastructures such as energy or transport, it is essential to implement IoT systems that ensure high reliability and security, since failures can lead to serious social and economic consequences. The intelligent-contextual classification model allows the identification of different operational contexts to enhance adaptability and security, considering characteristics like intelligence level, security needs, and complexity of integration with other technologies.

5. Dynamics of IoT Systems:

Dynamics reflect the system's ability to change its structure or functioning in response to environmental changes:

- a) *Static systems: fixed sensor networks;*
- b) *Mobile systems: devices that move through space;*
- c) *Swarm-based IoT: collective behavior of numerous autonomous devices.*

When building an intelligent-contextual classification model of IoT systems, it is important to consider not only the functional and technological aspects but also the system's ability to adapt to environmental changes, which is crucial for understanding its dynamics and security.

As noted in [11], dynamics is one of the key characteristics of modern IoT networks, which include static, mobile, and swarm-based devices capable of adapting to changing conditions. Accordingly, a well-structured classification must consider these capabilities and the various types of system adaptation to enhance effectiveness and threat resilience.

Practical Application of the Intelligent-Contextual Classification Model for IoT.

The intelligent-contextual classification model for the Internet of Things is not merely a theoretical concept — it opens up broad possibilities for practical implementation across a range of applied tasks related to the management, monitoring, and security of IoT systems. Thanks to its multidimensional approach, the proposed classification model forms a methodological foundation for building intelligent risk analysis systems, adaptive security, efficient resource management, and dynamic network configuration.

Here are several key areas of its application:

1. **Intelligent Adaptation of Security Policies:** Classification of devices based on intelligence level, security, architectural characteristics, and usage context enables the creation of adaptive security policies. Instead of universal solutions for the entire system, policies can be automatically adjusted according to the type of device and its operating environment. This increases the effectiveness of protection and optimizes the use of computational resources [12].

2. **Dynamic Resource and Topology Management:** Taking into account the intelligence level and context of devices allows for dynamic changes in network topology, data routing, and distribution of computing resources in real time. This is especially important for mobile and heterogeneous IoT environments where network conditions are constantly changing [13].

3. **Context-Aware Logging and Auditing:** Intelligent-contextual classification enables the optimization of monitoring and auditing processes by collecting only the information most relevant to a given device type and its environment. This improves attack detection accuracy and reduces the load on data processing systems [14].

4. **Enhanced Monitoring Efficiency:** Classification based on threat level and environmental dynamics allows monitoring systems to focus on the most at-risk areas of the network while reducing monitoring costs in low-risk segments. This ensures more effective anomaly and cyberattack detection, even under limited resources [15].

The intelligent-contextual classification model in IoT opens new prospects for solving practical challenges in system management, monitoring, and security. Due to its ability to adapt to changing conditions and computational capabilities, this approach enables more effective network management, optimizing resource usage and enhancing threat detection accuracy. In particular, the implementation of adaptive security policies, dynamic resource and topology management, as well as improved logging and auditing, becomes critically important for reducing system load and increasing overall security.

Figure 2 illustrates the block diagram of the practical application of the intelligent-contextual classification model for IoT.

Practical significance of the proposed model. The practical significance of the developed intelligent-contextual classification model lies in its wide applicability across real-world IoT systems. Specifically, the model enables:

1. Structured system-level analysis of IoT environments based on risk levels, embedded intelligence, architecture, and dynamics;
2. The development of adaptive, context-aware cybersecurity policies tailored to device types and operational scenarios;
3. Improved efficiency in monitoring and resource allocation through dynamic network reconfiguration and intelligent prioritization of risk zones;

Application in critical domains such as smart cities, Industry 4.0, eHealth, intelligent transport systems, and wearable personal monitoring, where resilience, security, and adaptability are essential.

Task 5: Evaluation of the effectiveness of the proposed model in comparison with traditional approaches, with a focus on adaptivity, security, and practical value.

Traditional approaches to the classification of Internet of Things (IoT) devices are typically based on fixed technical or functional parameters: sensor type, data transmission protocol, energy consumption, or system role. While such classification models can be useful during the design phase and initial deployment, they exhibit significant limitations in dynamic, heterogeneous, and context-dependent IoT environments.

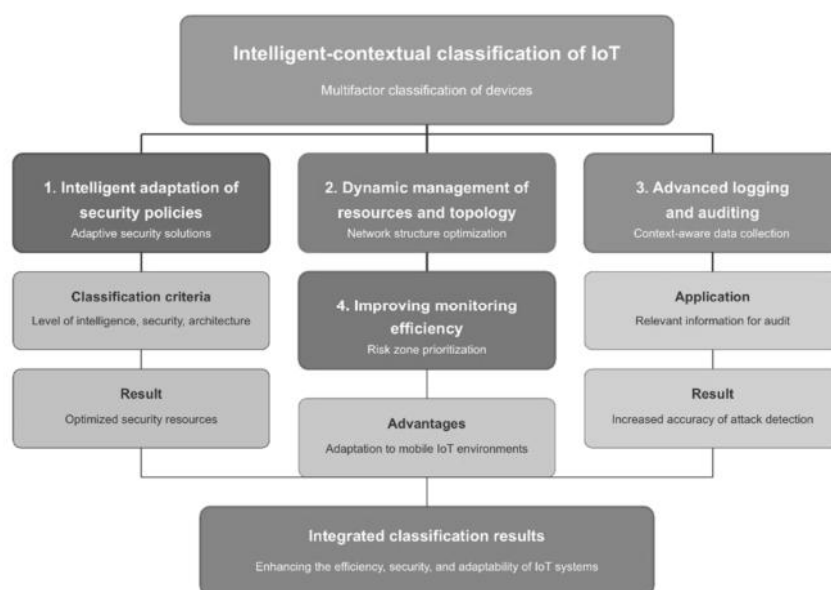


Figure 2- Block Diagram of the Practical Application of the Intelligent-Contextual Classification Model for the Internet of Things

Source: Developed by the author

Table 1 presents a comparison of the proposed intelligent-contextual classification model with traditional approaches to device classification and management in IoT. This comparison highlights a number of advantages that provide greater efficiency, flexibility, and adaptability of the proposed model under modern IoT operating conditions.

Adaptability to changing environmental conditions: Traditional approaches often apply fixed policies and templates for managing devices within a network, which leads to inefficiencies in dynamic and mobile IoT systems. In contrast, the intelligent-contextual classification model considers device context and changing states, allowing the network to adapt in real time to new conditions. This reduces resource consumption and improves overall system performance.

1. Intelligent adaptation of security policies: Traditional approaches often apply unified security policies to all devices, which proves ineffective in highly heterogeneous IoT environments. In contrast, the proposed intelligent-contextual classification model enables the adaptation of security policies to the specific characteristics of each device, including its intelligence level, type of data processing, and current level of protection. This approach provides a significantly higher level of security by allowing the dynamic adjustment of protective mechanisms based on the device's operating context, thereby greatly reducing the risk of cyberattacks.

2. Optimization of resource usage: Traditional approaches generally rely on static methods of resource management, which can lead to overload in certain network segments

and inefficient use of computational capacities. The proposed intelligent-contextual classification model enables dynamic resource management, data routing, and network topology configuration based on the current state of devices and their environment. This substantially increases the overall system efficiency, particularly in mobile and heterogeneous IoT environments where operational conditions frequently change.

3. Reduced load on monitoring and auditing systems: By collecting only the data most relevant to a specific device and its context, the proposed classification model helps reduce the volume of information processed by monitoring and auditing systems. This not only lowers the load on computational resources but also improves the accuracy of anomaly and cyberattack detection.

Table 1 - Comparison of the Intelligent-Contextual Classification Model with traditional approaches

<i>Criterion</i>	<i>Traditional Classification</i>	<i>Intelligent-Contextual Classification (Proposed)</i>
Classification Parameters	Technical (device type, interface, energy consumption)	Intelligence, security level, environmental dynamics, usage context, role in the network
Adaptability	Low – does not account for environmental changes or device behavior	High – devices can change categories depending on context or threats
Security Application	Limited – uniform policies for all devices of the same type	Adaptive – security policies change based on risk level and device context
Monitoring Use	Uniform – all devices are monitored at the same level	Risk-oriented – monitoring is prioritized based on context and threat level
Support for Dynamic Management	Minimal – fixed classification, no support for flexible role reassignment	Full – dynamic changes in topology, routing, and resources based on contextual shifts
Flexibility in Scalable Systems	Limited – increasing number of devices complicates management	High – intelligent rules enable automated control of large-scale networks

Source: Developed by the author

Thus, the intelligent-contextual classification model enables more effective management of IoT systems by enhancing their security and adaptability to changing operating conditions. This makes it significantly more advantageous compared to traditional methods that do not consider such dynamic interaction with the context and the intelligence level of devices.

Challenges and Limitations of the Intelligent-Contextual Classification Model in IoT. Despite its numerous advantages, the implementation of an intelligent-contextual classification model for devices in the Internet of Things (IoT) is accompanied by several challenges and limitations that must be addressed to ensure its effective application.

1. Heterogeneity of Devices and Limited Resources: the IoT environment consists of a large number of devices with varying computational power, energy consumption, and supported protocols. This creates difficulties in implementing a unified classification model. Devices with limited resources may not support complex machine learning or context processing algorithms. In a systematic review [16], researchers identified 14 major challenges related to heterogeneity in IoT, including the diversity of protocols, data formats, and computational limitations of devices. These factors complicate the integration and scalability of IoT systems.

2. Context Dynamism and Real-Time Adaptation: device context may change dynamically, requiring systems capable of real-time adaptation. However, ensuring such

adaptability requires the development of efficient mechanisms for collecting, analyzing, and updating contextual information, which can be a complex task in environments with limited resources and high network dynamism. Study [17] emphasizes the importance of edge computing as a means to enable real-time adaptability in dynamic environments. The research also highlights the significance of context-aware management, where decisions are made based on environmental changes, workload, and device types.

3. Lack of Standards and Limited Interoperability: current IoT systems suffer from a lack of unified standards for representing and exchanging contextual information. This complicates integration across platforms and devices from different manufacturers. In [18], the authors emphasize the insufficient standardization in data transmission and interpretation between devices, which significantly hinders achieving full interoperability among IoT components. The study also stresses that the development of unified standards is critically important for building scalable, secure, and adaptive IoT infrastructures.

4. Security and Privacy Issues of Contextual Data: processing contextual information, particularly personalized data, poses privacy risks for users. In the event of a data breach or misuse, serious security threats may arise. Article [19] discusses attacks such as data recovery, model poisoning, and leakage through federated learning.

5. Data Quality and Anomaly Handling: inaccuracy, incompleteness, or obsolescence of contextual data can significantly impact classification accuracy. Additionally, processes for detecting and filtering anomalies require complex logic that must be both adaptive and resource-efficient [20].

Despite the vast potential of the intelligent-contextual classification model, its large-scale implementation requires overcoming a number of technical, standardization, and ethical challenges. Future research should focus on developing energy-efficient adaptive algorithms for implementing the model, establishing industry-wide standards for IoT system classification, and ensuring the privacy and protection of personalized data in dynamic and heterogeneous IoT environments.

Conclusions. The research has implemented a full cycle of developing a novel classification model for Internet of Things (IoT) environments, addressing the challenges of modern technological systems—specifically, dynamic behavior, contextual sensitivity, heterogeneity, and high security demands. In line with the stated goal, the study successfully solved **five research tasks**:

1. Modern approaches to IoT classification were analyzed, and their limitations in the context of increasing system complexity and environmental dynamics were identified.
2. Five key classification criteria were defined: level of device intelligence, security level, interaction architecture, operational context, and system dynamism.
3. A conceptual intelligent-contextual classification model was developed, integrating technical and behavioral characteristics of IoT systems.
4. A block diagram was constructed to formalize the model's logic and enable integration into applied management, monitoring, and security systems.
5. A comparative analysis with traditional approaches was conducted, demonstrating the model's advantages in terms of adaptivity, scalability, management efficiency, and context-aware security policy implementation.

Scientific novelty of the obtained results lies in the following:

1. An intelligent-contextual classification model for IoT environments is proposed, which considers not only technical device parameters but also their intelligence level, architectural structure, application context, and system dynamism.
2. For the first time, the classification is formalized as a multidimensional function with five coordinates, enabling a unified description of complex and heterogeneous IoT networks.
3. A structural block diagram of the model is developed, allowing integration into decision support systems, monitoring tools, and adaptive control mechanisms.

4. A comprehensive comparison with traditional classification models was performed, substantiating the superiority of the proposed model in terms of adaptivity, security, and scalability.

Practical significance of the results is as follows:

1. The model can be applied for the structuring, analysis, and design of IoT environments, taking into account risk levels, dynamics, and operational context.

2. It enables the development of adaptive cybersecurity policies—security mechanisms can be automatically configured based on the device type, behavior, and application environment.

3. Resource management efficiency is improved—dynamic classification facilitates real-time optimization of routing, load balancing, and data processing.

4. The model is applicable across domains such as Smart Cities, Industrial IoT (Industry 4.0), medical sensor systems, transport, and personal wearable devices.

The intelligent-contextual classification of IoT environments opens wide prospects for further research and applied developments. In particular, future directions may include the integration of machine learning methods to enable real-time automatic classification of devices. This would support the creation of self-learning systems capable of continuously updating their security policies, routing strategies, and resource management in response to changes in device behavior and external conditions. Additionally, the model can be expanded through the use of fuzzy logic, ontological methods, or agent-based architectures, contributing to the development of autonomous, context-aware, and threat-resilient IoT systems.

List of References

1. Dixit P., Bhattacharya P., Tanwar S., Gupta R. Role of Artificial Intelligence in Internet of Things Systems: A Systematic Mapping Study. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 20. Article 6511. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/20/6511> (дата звернення: 28.04.2025).
2. Thibaud M., Chi H., Zhou W., Piramuthu S. Internet of Things (IoT) in high-risk environment, health and safety (EHS) industries: A comprehensive review. *Decision Support Systems*. 2018. Vol. 108. P. 79–95. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167923618300344?via%3Dihub> (дата звернення: 28.04.2025).
3. Islam S. R., Kwak D., Kabir M. H., Hossain M., Kwak K. S. The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. P. 678–708. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7113786> (дата звернення: 28.04.2025).
4. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, № 4. P. 2347–2376. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7123563> (дата звернення: 28.04.2025).
5. Dubey H., Sahoo P. K., Chahal P., Saini H. IoT Ecosystem — A survey on Classification of IoT. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*. 2020. Vol. 6, № 21. Article e4. URL: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.16-5-2020.2304170> (дата звернення: 28.04.2025).
6. Gupta M., Abdelsalam M., Khorsandroo S., Mittal S. A Review on Internet of Things: Communication Protocols, Wireless Technologies, and Applications. In: *Internet of Things and Cyber Physical Systems*. Springer, 2022. P. 353–370. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-2004-2_23 (дата звернення: 28.04.2025).
7. Hou Z., Ding Y., Jiao Y., Hu L., Wu D. O. A Survey of Recent Advances in Edge-Computing-Powered Artificial Intelligence of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, № 22. P. 16309–16328. URL: https://www.researchgate.net/publication/352386275_A_Survey_of_Recent_Advances_in_Edge-Computing-Powered_Artificial_Intelligence_of_Things (дата звернення: 28.04.2025).
8. Ferrag M. A., Friha O., Kantarci B., Tihanyi N., Cordeiro L., Debbah M., Hamouda D., Al-Hawawreh M., Choo K.-K. R. Edge Learning for 6G-enabled Internet of Things: A Comprehensive Survey of Vulnerabilities, Datasets, and Defenses. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/371728275_Edge_Learning_for_6G-enabled_Internet_of_Things_A_Comprehensive_Survey_of_Vulnerabilities_Datasets_and_Defenses (дата звернення: 28.04.2025).
9. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, № 4. P. 2347–2376. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095> (дата звернення: 28.04.2025).
10. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L. A., Coen-Porisini A. Security, Privacy and Trust in Internet of Things: The Road Ahead. *Computer Networks*. 2015. Vol. 76. P. 146–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008> (дата звернення: 28.04.2025).

11. Yang Z., Liu L., Zhang Y. A Survey on Security and Privacy Issues in Internet-of-Things. 2020. URL: <https://www.researchgate.net/publication/316173391> (дата звернення: 28.04.2025).
12. Khan M. A., Salah K., Rehman M. H. U., Jayaraman R., Arshad J., Madhusudan G. A survey on security and privacy issues in edge computing-assisted Internet of Things. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 82649–82674. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003780> (дата звернення: 28.04.2025).
13. Bhajantri N., Gangadharaiyah B. A Comprehensive Survey on Resource Management in Internet of Things. *Journal of Telecommunications and Information Technology*. 2020. № 4. P. 47–58. URL: <https://www.researchgate.net/publication/348071565> (дата звернення: 28.04.2025).
14. Zhang Y., Deng S., Liu Y., Taheri J., Ranjan R. Context-aware security in the Internet of Things: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021. Vol. 187. Article 103110. URL: <https://www.researchgate.net/publication/354857110> (дата звернення: 28.04.2025).
15. Hassan R., Elhoseny M., Mostafa M. M., Mehmood R. Data Anomaly Detection in the Internet of Things: A Review of Current Trends and Research Challenges. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2023. Vol. 15. Article 103489. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374498472> (дата звернення: 28.04.2025).
16. Noaman A., et al. Challenges in Integration of Heterogeneous Internet of Things. *Scientific Programming*. 2022. Article ID 8626882. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/8626882> (дата звернення: 28.04.2025).
17. Cortés A., Juan A. A., Pamos C. A review on edge computing in smart energy by means of a systematic mapping study. *Energies*. 2019. Vol. 12, № 20. Article 3877. URL: https://www.researchgate.net/publication/338245738_A_Review_on_Edge_Computing_in_Smart_Energy_by_means_of_a_Systematic_Mapping_Study (дата звернення: 28.04.2025).
18. Bandyopadhyay D., Sen J. Internet of Things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless Personal Communications*. 2011. Vol. 58, № 1. P. 49–69. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5> (дата звернення: 28.04.2025).
19. ElZemity A., Arief B. Privacy threats and countermeasures in federated learning for Internet of Things: A systematic review. *arXiv preprint*. arXiv:2407.18096. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.18096> (дата звернення: 28.04.2025).
20. Chatterjee A., Ahmed B. S. IoT Anomaly Detection Methods and Applications: A Survey. *Internet of Things*. 2022. Vol. 18. Article 100168. URL: https://www.researchgate.net/publication/361621845_IoT_Anomaly_Detection_Methods_and_Applications_A_Survey (дата звернення: 28.04.2025).

References

1. Dixit, P., Bhattacharya, P., Tanwar, S., & Gupta, R. (2024). Role of artificial intelligence in Internet of Things systems: A systematic mapping study. *Sensors*, 24(20), Article 6511. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/20/6511> (Accessed April 28, 2025).
2. Thibaud, M., Chi, H., Zhou, W., & Piramuthu, S. (2018). Internet of Things (IoT) in high-risk environment, health and safety (EHS) industries: A comprehensive review. *Decision Support Systems*, 108, 79–95. <https://www.sciencedirect.com/article/abs/pii/S0167923618300344?via%3Dihub> (Accessed April 28, 2025).
3. Islam, S. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The Internet of Things for health care: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 3, 678–708. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7113786> (Accessed April 28, 2025).
4. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7123563> (Accessed April 28, 2025).
5. Dubey, H., Sahoo, P. K., Chahal, P., & Saini, H. (2020). IoT ecosystem: A survey on classification of IoT. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 6(21), Article e4. <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.16-5-2020.2304170> (Accessed April 28, 2025).
6. Gupta, M., Abdelsalam, M., Khorsandroo, S., & Mittal, S. (2022). A review on Internet of Things: Communication protocols, wireless technologies, and applications. In *Internet of Things and Cyber Physical Systems* (pp. 353–370). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-2004-2_23 (Accessed April 28, 2025).
7. Hou, Z., Ding, Y., Jiao, Y., Hu, L., & Wu, D. O. (2021). A survey of recent advances in edge-computing-powered artificial intelligence of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(22), 16309–16328. <https://www.researchgate.net/publication/352386275> (Accessed April 28, 2025).
8. Ferrag, M. A., Friha, O., Kantarci, B., Tihanyi, N., Cordeiro, L., Debbah, M., Hamouda, D., Al-Hawawreh, M., & Choo, K.-K. R. (2023). Edge learning for 6G-enabled Internet of Things: A comprehensive survey of vulnerabilities, datasets, and defenses. <https://www.researchgate.net/publication/371728275> (Accessed April 28, 2025).
9. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095> (Accessed April 28, 2025).

10. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146–164. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008> (Accessed April 28, 2025).
11. Yang, Z., Liu, L., & Zhang, Y. (2020). A survey on security and privacy issues in Internet-of-Things. <https://www.researchgate.net/publication/316173391> (Accessed April 28, 2025).
12. Khan, M. A., Salah, K., Rehman, M. H. U., Jayaraman, R., Arshad, J., & Madhusudan, G. (2020). A survey on security and privacy issues in edge computing-assisted Internet of Things. *IEEE Access*, 8, 82649–82674. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003780> (Accessed April 28, 2025).
13. Bhajantri, N., & Gangadharaiyah, B. (2020). A comprehensive survey on resource management in Internet of Things. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 4, 47–58. <https://www.researchgate.net/publication/348071565> (Accessed April 28, 2025).
14. Zhang, Y., Deng, S., Liu, Y., Taheri, J., & Ranjan, R. (2021). Context-aware security in the Internet of Things: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 187, Article 103110. <https://www.researchgate.net/publication/354857110> (Accessed April 28, 2025).
15. Hassan, R., Elhoseny, M., Mostafa, M. M., & Mehmood, R. (2023). Data anomaly detection in the Internet of Things: A review of current trends and research challenges. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 15, Article 103489. <https://www.researchgate.net/publication/374498472> (Accessed April 28, 2025).
16. Noaman, A., et al. (2022). Challenges in integration of heterogeneous Internet of Things. *Scientific Programming*, 2022, Article 8626882. <https://doi.org/10.1155/2022/8626882> (Accessed April 28, 2025).
17. Cortés, A., Juan, A. A., & Pamos, C. (2019). A review on edge computing in smart energy by means of a systematic mapping study. *Energies*, 12(20), Article 3877. <https://www.researchgate.net/publication/338245738> (Accessed April 28, 2025).
18. Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of Things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49–69. <https://doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5> (Accessed April 28, 2025).
19. ElZemity, A., & Arief, B. (2024). Privacy threats and countermeasures in federated learning for Internet of Things: A systematic review. *arXiv preprint*, arXiv:2407.18096. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.18096> (Accessed April 28, 2025).
20. Chatterjee, A., & Ahmed, B. S. (2022). IoT anomaly detection methods and applications: A survey. *Internet of Things*, 18, Article 100168. www.researchgate.net/publication/361621845_IoT_Anomaly_Detection_Methods_and_Applications_A_Survey (Accessed April 28, 2025).

Ю. І. Підлісний

Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна

Інтелектуально-контекстна модель класифікації середовищ інтернету речей

У статті представлено інтелектуально-контекстну модель класифікації середовищ Інтернету речей (IoT), яка ґрунтується на комплексному врахуванні ключових параметрів, таких як рівень вбудованого інтелекту, контекст функціонування, рівень безпеки та динамічність системи. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням складності екосистем IoT, що характеризуються гетерогенністю пристроїв, різноманітністю умов експлуатації, необхідністю адаптації до змін у навколишньому середовищі та підвищеними вимогами до безпеки. Критичний аналіз існуючих підходів до класифікації IoT виявив їхні основні обмеження: вузьку орієнтацію виключно на технічні або функціональні ознаки, недостатнє врахування поведінкових характеристик та інтелекту пристроїв, а також ігнорування контексту функціонування та ландшафту кіберзагроз.

Розроблена модель усуває зазначені недоліки та забезпечує точніше структурування середовищ IoT шляхом урахування їхнього функціонального призначення, архітектурних особливостей та здатності до автономного прийняття рішень. Вона може застосовуватися для системного аналізу, формалізації ризиків, оптимізації механізмів реагування на загрози, а також проєктування ефективних стратегій кібербезпеки та адаптивного управління в динамічних середовищах. Запропонована класифікація дає змогу узагальнити існуючі типи IoT-систем і закладає підґрунтя для розробки нових, більш гнучких і захищених архітектур. Практична значущість отриманих результатів полягає в їхній придатності для використання в різних галузях, де важливими є інтелектуальна обробка даних, контекстна обізнаність і стійкість до кіберзагроз - зокрема в Індустрії 4.0, електронній охороні здоров'я, інтелектуальних транспортних системах і розумних містах.

інтернет речей, класифікація IoT, інтелектуальні системи, безпека, контекст використання, динамічність, адаптація, кіберзахист, інтелектуально-контекстна модель

Одержано (Received) 29.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 06.06.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

УДК 004.4+519.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.31-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43)

М. Ф. Семенюта¹, доц., канд. ф.-м. наук, **С. М. Якименко**¹, доц., канд. ф.-м. наук,
С. І. Осадчий², проф., д-р техн. наук

¹*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

²*Українська державна льотна академія, м. Кропивницький, Україна*

e-mail: semeniutamf@kntu.kr.ua, yasm@i.ua, srg2005@ukr.net

Оптимальне планування маршрутів безпілотних літальних апаратів для ефективного покриття заданої території

Робота присвячена розв'язанню проблеми обльоту сонячних панелей при їх технічному обслуговуванні, яка є частинним випадком задачі комівояжера. Розглянуто алгоритми здатні швидко розраховувати маршрути без значного навантаження на обчислювальні ресурси. Розроблено програму, що реалізує описану математичну модель задачі. Експериментальні дослідження дозволили визначити ефективність задіяних алгоритмів.

БПЛА, задача комівояжера, жадібний метод, 2-Opt алгоритм, мурашиний алгоритм, генетичний алгоритм, граф

Постановка проблеми. Оптимізація маршрутів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є однією з ключових задач у сфері автономних систем та штучного інтелекту. Вона набуває особливого значення через широке використання БПЛА у цивільних і військових сферах. Ефективне прокладання маршрутів дозволяє підвищити продуктивність місій, зменшити витрати енергії та забезпечити точний збір даних. Основні критерії оптимізації включають мінімізацію часу виконання місії, зниження енергоспоживання та максимальне покриття досліджуваної території при дотриманні експлуатаційних обмежень, таких як ємність батареї та навігаційні можливості БПЛА [1].

У даній роботі розглядається задача оптимального планування маршруту БПЛА для обльоту заданого набору точок, що використовуються для збору даних, моніторингу або виявлення аномальних явищ. Для її розв'язання застосовуються як офлайн, так і онлайн методи планування. Серед найпоширеніших підходів – класичні алгоритми дискретної оптимізації (динамічне програмування, алгоритм Дейкстри, A* алгоритм), евристичні методи (жадібний алгоритм, 2-opt, генетичні алгоритми, мурашиний алгоритм) та комбіновані стратегії, що поєднують декілька підходів для підвищення ефективності. Однак жоден з них не є універсальним, оскільки їх продуктивність залежить від складності місії, кількості точок, обмежень енергоспоживання, особливостей середовища та специфіки задачі [2-4]. Додаткову складність вносить необхідність адаптації маршруту в реальному часі у відповідь на змінні фактори, такі як поява нових перешкод, зміни погодних умов або непередбачувані технічні обмеження. БПЛА оснащені процесорами з обмеженою продуктивністю, що вимагає алгоритмів, здатних швидко розраховувати маршрути без значного навантаження на обчислювальні ресурси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Планування маршруту БПЛА через контрольні точки є варіантом задачі покриття цілей, де необхідно відвідати заданий набір точок з урахуванням певних обмежень. Вона перетворюється на задачу комівояжера

(TSP), коли точки старту і фінішу збігаються. Така задача є NP-повною і класичні методи неперервної оптимізації мало придатні для неї, тому використовуються методи комбінаторної оптимізації. Огляд існуючих стратегій планування маршруту БПЛА представлений у роботах [1-9]. Переважна більшість запропонованих алгоритмів ґрунтується на евристичних чи метаввристичних підходах. Жадібний алгоритм є типовим прикладом евристики. Він вибирає найбільш вигідне рішення на кожному етапі (наприклад, вибір наступної точки в задачі комівояжера, що дає найменшу відстань), не враховуючи майбутні наслідки, що може призвести до субоптимальних рішень [10].

2-Opt алгоритм відноситься до найпростіших евристик та разом з його модифікаціями є важливим інструментом розв'язку задачі комівояжера [11]. Він починається з довільного огляду маршруту, а потім неодноразово замінює два ребра маршруту двома іншими ребрами, якщо це дає кращий результат. 2-Opt припиняє роботу, якщо неможливо внести подальші покращення в маршрут, який називають 2-оптимальним. В оригінальному варіанті евристики Ліна-Кернігана [12] допускаються k -заміни, які можуть бути подані у вигляді 2- або 3-замін з наступними 2-замінами.

Метаввристики орієнтовані на знаходження хороших рішень за розумний час, навіть для складних задач, проте не гарантують оптимальності. Вони універсальні, оскільки не залежать від специфіки задачі та можуть застосовуватись до різних типів комбінаторних задач. Ці алгоритми часто імітують природні процеси або еволюційні механізми. До таких алгоритмів відносяться алгоритм мурашиних колоній (ACO), що використовує феромони для пошуку оптимальних або наближених до оптимальних рішень; генетичні алгоритми (GA), які імітують еволюційні процеси з мутаціями, схрещуванням та відбором. Ці методи є важливими інструментами в задачах комбінаторної оптимізації, оскільки дозволяють знаходити якісні рішення в реальному часі, навіть для динамічних або непередбачуваних умов.

Алгоритм оптимізації мурашиних колоній (ACO) є одним з базових методів в задачах комбінаторної оптимізації, зокрема задачі комівояжера при плануванні маршрутів для БПЛА [13]. Різні дослідники запропонували низку вдосконалень ACO, щоб підвищити його ефективність та адаптивність в динамічних умовах. Одним із напрямків вдосконалення є впровадження динамічних евристичних функцій і використання B-сплайнів, що дозволяє створювати плавні траєкторії та досягати більш швидкої збіжності алгоритму [14]. Інтеграція кількох евристичних елементів разом із накладанням обмежень на рівень феромонів допомагає уникати локальних оптимумів і підвищує ефективність пошуку в складних середовищах.

Генетичні алгоритми активно використовуються для оптимізації маршрутів БПЛА, що дозволяє значно зменшити час виконання місії, враховуючи зовнішні впливи та енергетичні обмеження. Ці еволюційні алгоритми дозволяють шукати оптимальні шляхи в задачі комівояжера як для двох так і трьох вимірних просторів, і очікується, що кожне їх покоління краще попереднього [3]. У комбінації з іншими методами, цей підхід дає змогу ефективно планувати траєкторії, зокрема, для тривалих польотів та умов високої варіативності навколишнього середовища [3, 4, 15].

Ще однією важливою технологією є глибинне навчання для адаптації маршрутів БПЛА в реальному часі. Роботи [16, 17] підкреслюють важливість використання нейронних мереж для забезпечення високої точності та ефективності планування маршрутів у динамічних умовах.

Комбіновані методи, що поєднують кілька алгоритмів, також знаходять широке застосування в оптимізації маршрутів БПЛА. Наприклад, Q. Chengwei Zhang і Qi Feng пропонують комбінування мурашиного і A^* алгоритмів для створення більш

ефективних моделей планування маршрутів, шляхом аналізу стратегій покращення АСО [18]. В якості моделі вони розглянули сітковий граф, згенерувавши кілька еталонних маршрутів оптимізації за допомогою алгоритму АСО. Це дало можливість значно покращити вибір оптимального маршруту знижуючи час виконання місій і зменшуючи енергетичні витрати.

Аналіз робіт показує, що оптимізація маршрутів для БПЛА залишається складною і багатоаспектною задачею, яка вимагає як розробки нових підходів, так і вдосконалення існуючих методів для забезпечення точності, ефективності та надійності виконання польотних завдань.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка підходу до планування оптимального маршруту БПЛА для інспекції об'єктів критичної інфраструктури, таких як вежі стільникового зв'язку, трансформаторні підстанції, нафтові вишки, а також об'єкти аеродрому (злітно-посадкові смуги, навігаційні вогні, радіолокаційні станції тощо). Необхідно здійснити обліт заданого набору точок, причому кожна точка має бути відвідана рівно один раз, і між будь-якими двома точками існує маршрут. Після відвідування всіх об'єктів дрон повинен повернутися в початкову точку. Оптимізація маршруту спрямована на мінімізацію сумарного часу польоту та енергетичних витрат, що забезпечить ефективне покриття території та раціональне використання ресурсів БПЛА.

Для реалізації поставленої мети розв'язувалися наступні завдання:

1. Розробити математичну модель оптимального планування маршруту БПЛА, яка формалізує задачу інспекції заданих об'єктів, розташованих на певній території.
2. Реалізувати та порівняти різні алгоритми оптимізації маршруту: жадібний метод, 2-Opt, мурашиний алгоритм (АСО) та генетичний алгоритм.
3. Провести аналіз ефективності обраних алгоритмів за критеріями довжини маршруту, енергетичних витрат та часу виконання обчислень.
4. Адаптувати алгоритми для випадку інспекції сонячних панелей, враховуючи обмеження на висоту та швидкість польоту.
5. Визначити доцільність застосування кожного з алгоритмів у контексті обльоту сонячних панелей БПЛА та розробити рекомендації щодо їх використання.

Припускаємо, що БПЛА підтримує постійну висоту та швидкість польоту під час виконання завдання. Оптимізація маршруту спрямована на мінімізацію сумарного часу польоту та енергетичних витрат, що забезпечить ефективне покриття території та раціональне використання ресурсів БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Інспекція сонячних панелей – це процес перевірки стану панелей для виявлення можливих пошкоджень, ефективності їх роботи та виявлення проблем, що можуть впливати на їх продуктивність. Це важлива частина технічного обслуговування сонячних установок, яка допомагає підтримувати їх у належному стані та максимально ефективно генерувати енергію. Під час інспекції можна отримати такі дані:

- температурні показники, які отримують з тепловізорів або спеціальних датчиків для виявлення гарячих точок;
- зображення або відео для аналізу фізичних пошкоджень або інших дефектів панелей;
- енергетичні показники: напруга, струм або інші параметри, що дозволяють оцінити роботу панелей.

Енергетичні показники сонячних панелей можна отримати різними способами для здійснення детального моніторингу їх роботи та ефективності. Один із основних методів – це використання вбудованих систем моніторингу, які присутні в багатьох

сучасних сонячних панелях та інверторах. Ці системи надають дані про ключові енергетичні показники, такі як напруга, струм, потужність, коефіцієнт корисної дії, а також продуктивність окремих панелей та загальну потужність системи. Дані з таких систем доступні через інтерфейси на веб-платформах або мобільні додатки, що дає можливість здійснювати моніторинг в реальному часі з будь-якої точки. Іншим важливим джерелом даних є інвертори, які перетворюють постійний струм на змінний. Вони також збирають енергетичні показники, такі як поточна вироблена потужність, напруга та струм, і можуть бути підключені до центральних моніторингових систем або локальних датчиків. Це дає змогу здійснювати детальніший контроль за роботою сонячних панелей та швидко виявляти будь-які відхилення. Ще одним методом отримання енергетичних показників є використання спеціальних датчиків потужності. Ці датчики можуть бути встановлені на кожній панелі або на групах панелей для вимірювання поточної потужності, що генерується. З їх допомогою оцінюють ефективність роботи, порівнюють їх продуктивність та виявляють можливі проблеми. Одним з найбільш інноваційних підходів є використання БПЛА для інспекції сонячних панелей. Дрони, оснащені тепловізорами або іншими сенсорами, можуть швидко облітати великі території сонячних ферм і виявляти «гарячі» точки, які свідчать про знижену продуктивність або дефекти панелей. Така інспекція дає змогу своєчасно виявити проблеми, що можуть бути непомітні під час звичайної перевірки. Якщо дрони оснащені датчиками для збору даних про напругу та струм, то отримують більш точніші показники роботи панелей без необхідності фізичного доступу до кожної з них. Важливою перевагою використання БПЛА є їх здатність швидко обробляти великі площі, що значно скорочує час на інспекцію та знижує витрати на обслуговування.

Інтеграція всіх цих технологій в єдину систему моніторингу дозволяє отримувати актуальні та точні дані про ефективність сонячних панелей. Використання БПЛА у поєднанні з іншими методами моніторингу дає змогу швидко виявляти будь-які проблеми і оптимізувати роботу сонячних установок, що робить їх більш ефективними та економічними в експлуатації. Крім цього, виробники енергії отримають можливість реалізації задачі планування оптимального маршруту для інспекції сонячних панелей на великих територіях, де необхідно облітати значну кількість точок збору даних. Мета полягає в тому, щоб дрон відвідав ці точки в найкоротший час, не перевищуючи обмеження на час польоту та енергоспоживання батареї. Після збору всіх необхідних даних дрон повинен повернутися в точку старту для завершення місії. Це дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси БПЛА, мінімізуючи час інспекції та витрати енергії.

Задачу планування оптимального маршруту для інспекції сонячних панелей на великих територіях можна формалізувати за допомогою графової моделі, переходячи від 3D моделі до двовимірної задачі. Нехай задано множину точок $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, які необхідно відвідати для збору даних. Точка v_1 ставиться у відповідність стартовій позиції дрону, решта точок $v_1, v_2, \dots, v_n$ відповідає локаціям на сонячних панелях для збору даних. В якості математичної моделі розглядаємо неорієнтований зважений граф $G=(V, E)$, який є повним графом, де V – множина вершин, кожна з яких представляє точку обльоту, E – множина ребер, що з'єднують кожну пару вершини. Кожному ребру $e_{ij} \in E$ приписується вага w_{ij} , яка відповідає витратам на переміщення між точками v_i та v_j . Ця вага залежить від відстані між точками та енергетичними витратами БПЛА.

Необхідно знайти маршрут, який починається і закінчується в точці v_1 і проходить через всі точки з множини V , мінімізуючи загальні витрати:

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2, j \neq i} w_{v_i, v_j} \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

де $x_{ij} \in \{0, 1\}$ за умови

$$\sum_{j \neq i}^n x_{ij} = 1, \text{ якщо існує маршрут з вершини } i \text{ в вершину } j;$$

$$\sum_{j \neq i}^n x_{ij} = 0, \text{ якщо не існує маршрут з вершини } i \text{ в вершину } j;$$

Кожна точка $v_i \in V$ має бути відвідана рівно один раз. Загальні витрати (час і/або енергія) не повинні перевищувати заданих лімітів. Ця задача є варіацією відомої задачі комівояжера на повному графі з фіксованою початковою та кінцевою вершинами. Вона відноситься до задач комбінаторної оптимізації, для яких точні алгоритми на практиці майже не застосовуються в зв'язку з великими часовими затратами навіть для малих значень n . Пропонуємо для її розв'язання застосувати чотири наближені методи оптимізації: жадібний метод, 2-Opt алгоритм, оптимізація мурашиними колоніями, генетичний алгоритм та виконати їх порівняння. Вибір цих алгоритмів базується на їхній ефективності, поширеності у практичному застосуванні, здатності адаптуватися до різних умов. При малих розмірах вихідних даних висока ймовірність знаходження рішень близьких до оптимальних або ж оптимального рішення.

Вибір моделі дрона є ключовим аспектом, оскільки технічні характеристики дронів визначають їхню здатність виконувати завдання з максимальною ефективністю. Нами проведено аналіз технічних характеристик можливих моделей дронів, на основі якого обрано модель DJI Matrice 300 RTK, оскільки вона є однією з популярних в професійному використанні для картографії та моніторингу. DJI Matrice 300 RTK має такі характеристики: максимальна швидкість: 23 м/с; максимальна висота польоту: 7000 м; максимальна тривалість польоту: до 55 хвилин; максимальна відстань: 15 км (при оптимальних умовах); вага дрону: 3.6 кг. Припускаємо, що БПЛА підтримує постійну висоту та швидкість польоту під час виконання завдання.

Оцінку втрат енергії здійснюємо за формулою

$$E = P \cdot t, \quad (2)$$

Де P – середнє споживання потужності (Вт), t – час польоту на маршруті (год).

Жадібний метод обрано як базовий підхід, оскільки він забезпечує швидкий пошук розв'язку за рахунок локальної оптимізації на кожному кроці. Його перевага полягає у простоті реалізації та низьких обчислювальних витратах. Для вирішення поставленої задачі пропонуємо наступний жадібний алгоритм:

Алгоритм 1.

Крок 1. Ініціалізація (вхідні координати точок (вершин графа) N , матриця суміжності даного графа, початкова точка (вершина) s).

Крок 2. Ініціалізація маршруту з початкової вершини s .

Крок 3. Обчислення відстані до всіх невідвіданих вершин із поточної вершини.

Крок 4. Вибір найближчої невідвіданої вершини на основі матриці відстаней та додавання її до маршруту.

Крок 5. Позначення вибраної вершини як відвіданої.

Крок 6. Повторення кроків 3-5, поки всі вершини не будуть відвідані.

Крок 7. Повернення до початкової вершини та завершення маршруту.

Крок 8. Обчислення загальної відстані та енергоспоживання для побудованого маршруту.

Наступним популярним методом локального покращення маршрутів, що використовуються у задачах комівояжера, є 2-opt алгоритм. В цьому методі на кожному кроці два ребра поточного маршруту замінюються іншими двома ребрами так, щоб вийшов коротший маршрут. Послідовність дій у 2-opt алгоритмі опишемо таким чином:

Алгоритм 2.

Крок 1. Ініціалізація (вхідний початковий маршрут, кількість точок N).

Крок 2. Обчислення загальної довжини початкового маршруту.

Крок 3. Для кожної пари ребер у маршруті оцінка зміни маршруту шляхом обміну двох ребер (операція 2-opt).

Крок 4. Якщо операція 2-opt зменшує загальну довжину, виконання обміну та оновлення маршруту.

Крок 5. Повторення кроків 3-4, поки не буде досягнуто неможливості подальшого покращення.

Крок 6. Повернення оптимізованого маршруту та його загальної довжини.

Крок 7. Обчислення енергоспоживання для побудованого маршруту.

АСО обрано завдяки його ефективності у знаходженні найкоротших шляхів і гнучкості у вирішенні задач комбінаторної оптимізації. У контексті задачі комівояжера він демонструє високу здатність будувати оптимальні маршрути, використовуючи феромонні сліди для збереження інформації про перспективні шляхи. Ітеративний підхід алгоритму забезпечує поступове вдосконалення результатів. Деталізований опис його роботи у контексті задачі інспекції панелей наведено нижче:

Алгоритм 3.

Крок 1. Ініціалізація (кількість мурах M , матриця феромонів τ , матриця евристики η , коефіцієнт випаровування феромонів ρ , інтенсивність феромонів Q , кількість ітерацій T).

Крок 2. Розміщення M мурах у випадково вибраних вершинах (точках) даного графа.

Крок 3. Для кожної мурахи обчислення ймовірності переходу до кожної невідвіданої вершини за правилом:

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k \in M} \tau_{ik}^{\alpha} \eta_{ik}^{\beta}}, \quad (3)$$

де p_{ij} – ймовірність переходу мурахи з поточної точки i до точки j ; τ_{ij} – кількість феромону між точками i та j ; η_{ij} – евристична оцінка переходу від точки i до j (зазвичай

ця величина обернена до ваги відповідного ребра: $\eta_{ij} = \frac{1}{w_{ij}}$); α – параметр, що

визначає важливість феромону для прийняття рішення; β – параметр, що визначає важливість евристичної оцінки (ваги) для прийняття рішення; M – множина

невідвіданих вершин даного графа; $\sum_{k \in M} \tau_{ik}^{\alpha} \eta_{ik}^{\beta}$ – нормалізація, яка забезпечує, що сума ймовірностей переходу до всіх невідвіданих точок дорівнює 1.

Механізм вибору: мураха обчислює p_{ij} для всіх невідвіданих точок j . Потім застосовується стохастичний вибір, щоб вибрати наступну точку для переходу.

Крок 4. Перехід мурахи до наступної вершини графа на основі обчислених ймовірностей (стохастичний вибір).

Крок 5. Оновлення списку заборонених (таблиці відвіданих точок) для кожної мурахи.

Крок 6. Якщо всі вершини графа відвідано, обчислення загальної довжини маршруту для кожної мурахи.

Крок 7. Оновлення феромонів на ребрах за правилом:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}, \quad (4)$$

де ρ – коефіцієнт випаровування феромону ($0 < \rho < 1$); $(1 - \rho) \tau_{ij}$ – частина феромону, яка залишається після випаровування; $\Delta \tau_{ij}$ – кількість феромону, доданого на ребро ij , залежить від якості розв'язку, знайденого мурахою.

Крок 8. Повторення кроків 3-7 протягом T ітерацій.

Крок 9. Повернення найкоротшого маршруту, знайденого будь-якою мурахою.

Крок 10. Обчислення енергоспоживання для побудованого маршруту.

АСО відомий своєю здатністю враховувати складні обмеження та знаходити розв'язки в умовах великої кількості можливих комбінацій.

Генетичний алгоритм (GA) обрано через його успішність у вирішенні складних задач оптимізації, зокрема задач комівояжера. Він імітує природний процес еволюції, використовуючи операції селекції, кросоверу та мутації для поступового вдосконалення рішень. Завдяки цьому алгоритм добре справляється з нелінійними задачами та може ефективно шукати рішення в умовах обмежень, таких як перешкоди чи обмеження по енерговитратах. Представимо покроковий опис алгоритму для вище сформульованої задачі інспекції панелей:

Алгоритм 4.

Крок 1. Ініціалізація (розмір популяції P , ймовірність мутації r_m , ймовірність схрещування r_c , кількість поколінь G).

Крок 2. Генерація початкової популяції P випадкових маршрутів.

Крок 3. Оцінка пристосованості кожного маршруту в популяції на основі загальної відстані.

Крок 4. Вибір батьківських маршрутів за стратегією відбору (наприклад, рулетка або турнірний відбір).

Крок 5. Виконання схрещування між вибраними батьками для генерації нащадків.

Крок 6. Застосування мутації до нащадків із ймовірністю r_m .

Крок 7. Змінення поточної популяції новою популяцією.

Крок 8. Повторення кроків 3–7 протягом G поколінь або до досягнення критерію зупинки.

Крок 9. Повернення найкращого маршруту та його пристосованості.

Крок 10. Обчислення енергоспоживання для побудованого маршруту.

Дослідження ефективності алгоритмів 1-4 проведемо за допомогою їх програмної реалізації, розробленої авторами на мові Python. Кожен алгоритм застосовувався до задачі комівояжера, сформованої для 20 точок на повному графі. Основними критеріями оцінки виступали: довжина знайденого маршруту, витрачений на нього час, витрати енергії, а також час виконання і збіжність алгоритму. Для наочності отримані результати подано в таблиці 1.

На рис.1-4 представлені маршрути згенеровані за допомогою чотирьох різних алгоритмів (жадібний метод, 2-Опт, мурашиний алгоритм і генетичний алгоритм). Кожен з них має своє місце у практичному застосуванні, оскільки вони дозволяють вирішити певні завдання оптимізації з урахуванням специфічних вимог до часу виконання та використання енергетичних ресурсів. Отримані маршрути (рис.1-4) демонструють варіативність у підходах до оптимізації. Візуалізація результатів показує, як різні алгоритми можуть по-різному структурувати шляхи, що впливає на загальну ефективність маршруту.

Таблиця 1 – Оптимізаційні показники маршрутів для різних алгоритмів

Алгоритм	Оптимальний маршрут	Довжина маршруту, м	Час, с	Витрати енергії, Дж	Час виконання, с
1	[0, 4, 8, 12, 16, 17, 13, 9, 5, 1, 2, 6, 10, 14, 18, 19, 15, 11, 7, 3, 0]	1880.00	81.74	9400.00	0.001277
2	[0, 4, 1, 2, 3, 7, 11, 15, 14, 10, 6, 5, 9, 8, 12, 16, 13, 17, 18, 19, 0]	2194.76	95.42	10973.80	0.1852
3	[[0, 4, 8, 12, 16, 17, 13, 9, 5, 6, 10, 14, 18, 19, 15, 11, 7, 3, 2, 1, 0]	1720.00	74.78	8600.00	4.8668
4	[1, 5, 9, 19, 15, 11, 7, 3, 2, 6, 10, 14, 18, 13, 17, 16, 12, 8, 4, 1]	1832.25	79.66	9161.25	1.4771

Джерело: розроблено авторами

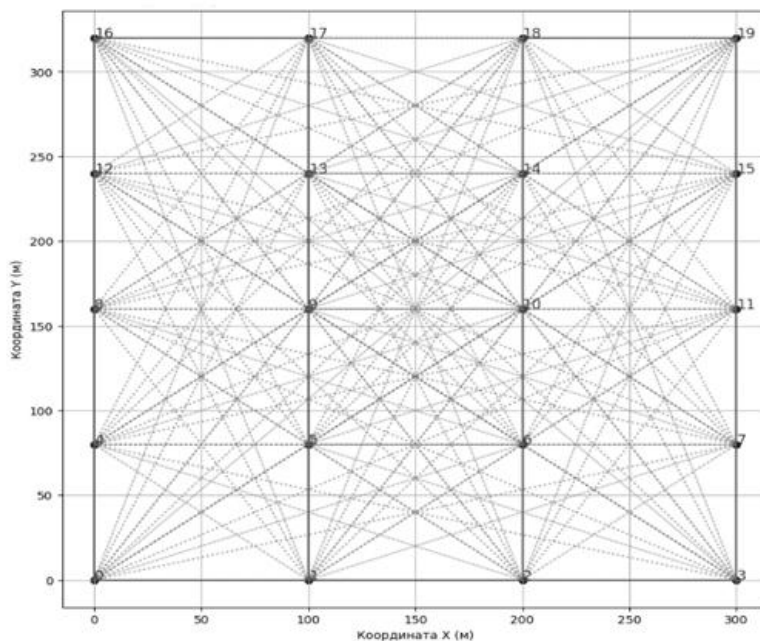


Рисунок 1 – Візуалізація оптимального маршруту інспекції сонячних панелей за допомогою жадібного алгоритму

Джерело: розроблено авторами

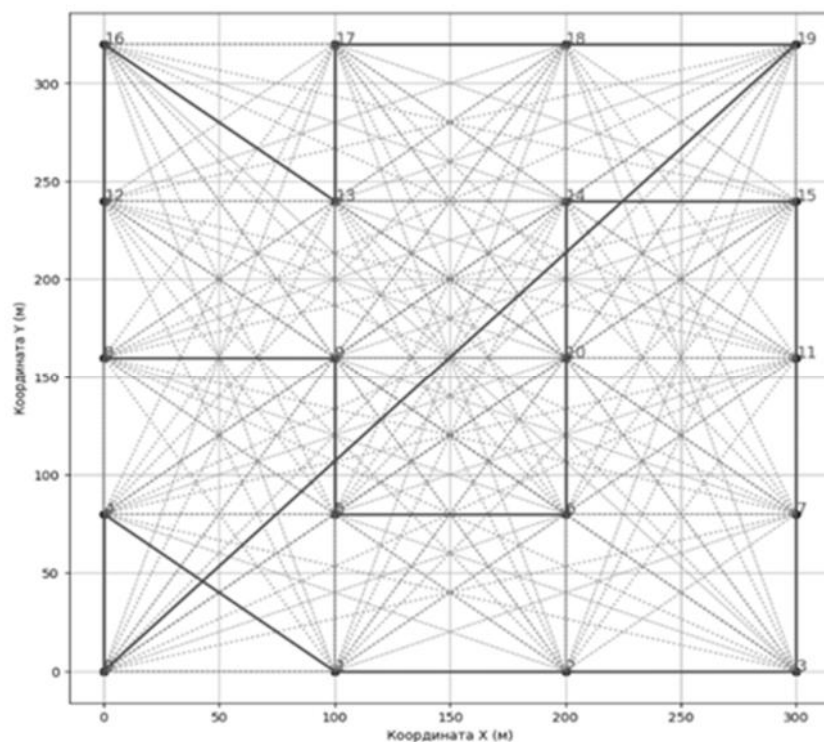


Рисунок 2 – Візуалізація оптимального маршруту інспекції сонячних панелей за допомогою 2-орт алгоритму

Джерело: розроблено авторами

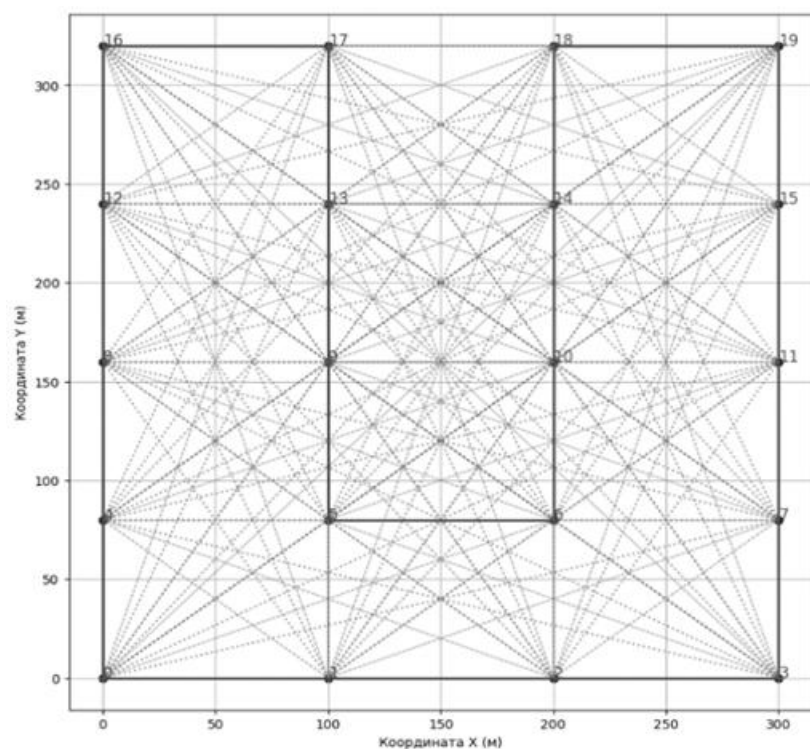


Рисунок 3 – Візуалізація оптимального маршруту інспекції сонячних панелей за допомогою мурашиного алгоритму

Джерело: розроблено авторами

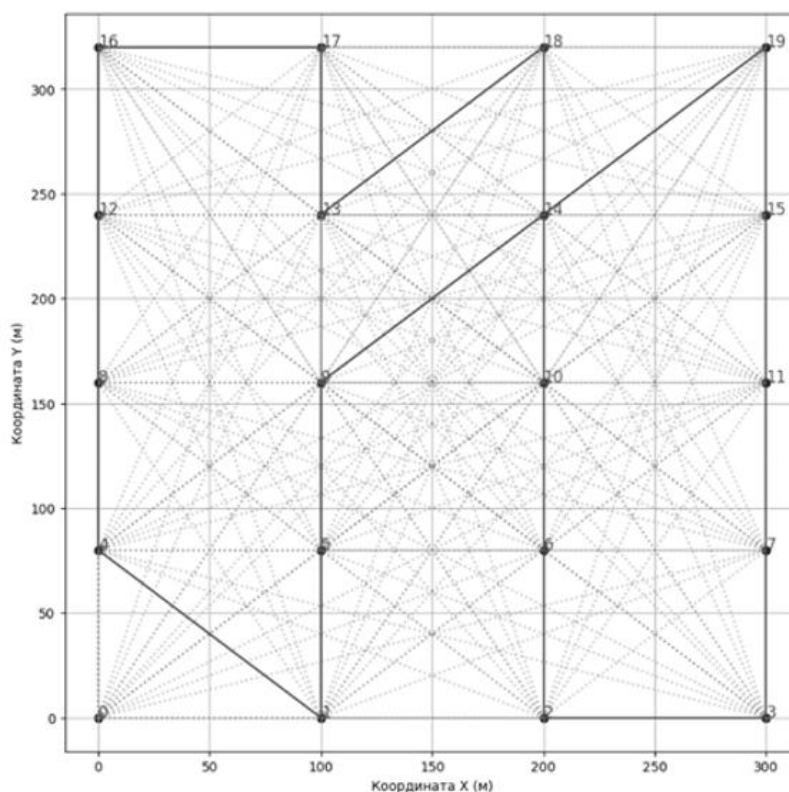


Рисунок 4 – Візуалізація оптимального маршруту інспекції сонячних панелей за допомогою мурашиного алгоритму

Джерело: розроблено авторами

Жадібний метод є доцільним для швидкого отримання початкового рішення, яке дає маршрут без значних витрат часу на обчислення. Однак, цей метод не завжди забезпечує оптимальність, тому його використання обмежене задачами, де важлива швидкість, а не точність. За результатами дослідження, жадібний метод показав найменші витрати часу (0.001277 с), однак по витратах енергії та довжині маршруту займає передостанню позицію, що свідчить про низьку ефективність в оптимізації маршруту. Алгоритм 2-Орт також не гарантує глобального оптимуму, тому його застосування доцільне в ситуаціях, де потрібно досягти покращеного результату без значних обчислювальних затрат. Він показав найгірші результати за оптимізаційними показниками в порівнянні з іншими алгоритмами. Мурашиний алгоритм, завдяки принципу колективного пошуку та адаптивному характеру, є потужним інструментом для досягнення більш ефективних маршрутів, особливо в складних умовах, коли є необхідність оптимізації енергоспоживання та покращення точності маршруту. Цей алгоритм дає значно кращі результати в порівнянні з іншими, але час, витрачений на його виконання (4.8668 с), є найбільшим. Генетичний алгоритм забезпечує одні з найкращих оптимальних результатів завдяки глобальному пошуку рішення, хоча його виконання потребує більше часу та обчислювальних ресурсів (час виконання – 1.4771 с) порівняно з жадібним методом та АСО, але значно менше ніж для мурашиного алгоритму. Він ідеально підходить для задач, де максимальна точність маршруту має ключове значення, і є можливість витратити більше часу на обчислення.

Висновки. 1. Розроблено математичну модель задачі інспекції сонячних панелей за допомогою БПЛА, яка зводиться до класичної задачі комівояжера на повному графі.

2. Для оптимізації маршрутів збору інформації було застосовано чотири алгоритми: жадібний, 2-opt, АСО та генетичний алгоритм.

3. Проведено порівняльний аналіз ефективності алгоритмів. Мурашиний і генетичний алгоритми продемонстрували найкращі показники з точки зору оптимізації маршруту і витрат енергії. Жадібний метод є найбільш швидким, але його рішення менш оптимальні. Алгоритм 2-Орт виявився неефективним через високі витрати енергії і довжину маршруту. Доцільність використання кожного з цих алгоритмів залежить від специфіки задачі.

4. Для швидкого отримання первинного рішення можна використовувати жадібний метод. У разі необхідності швидкої локальної оптимізації маршрутів може бути застосований 2-Орт алгоритм. Для досягнення найкращих результатів за критерієм мінімізації витрат енергії та довжини маршруту доцільне застосування мурашиного алгоритму. Генетичний алгоритм є перспективним у задачах, де необхідний баланс між якістю та часом обчислень.

5. Для задачі обльоту сонячних панелей ферми важливо комбінувати алгоритми, що дозволяє досягти оптимального балансу між часом виконання та якістю маршруту, враховуючи обмеження на енергоспоживання БПЛА.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення методів планування маршрутів дронів. Перспективи дослідження в цьому напрямі також можуть включати розвиток гібридних підходів, які поєднують переваги кількох алгоритмів, що дозволить досягти більш ефективних результатів у зменшенні часу та енергоспоживання. Також важливим напрямком є адаптація алгоритмів до реальних умов, де необхідно враховувати зміни в оточуючому середовищі, такі як перешкоди або зміни погодних умов.

Список літератури

1. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.13.06 / Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, 2020. 192 с.
2. Вадіс Д., Аврутов В. Методи підвищення функціональної ефективності БПЛА. *Механіка гіроскопічних систем: науково-технічний збірник*. 2024. Вип. 48. С.55-68. URL: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891>
3. Sonmez A., Kocyigit E., Kugu E. (2015). Optimal path planning for UAVs using genetic algorithm. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. June 9-12, 2015. Denver Marriott Tech Center Denver, Colorado, USA, 2015. P.50-55. DOI: 10.1109/ICUAS.2015.7152274
4. Wang H., Pan W. (2021) Research on UAV Path Planning Algorithms. *8-th Annual International Conference on Geo-Spatial Knowledge and Intelligence IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 693. 2021. DOI:10.1088/1755-1315/693/1/012120
5. Jiang Y., Xu X.-X., Zheng M.-Y., Zhan Z.-H. (2024). Evolutionary computation for unmanned aerial vehicle path planning: a survey. *Artificial Intelligence Review*. 2024 Vol. 57, № 10. DOI: 10.1007/s10462-024-10913-0
6. Vorotnikov V., Gumenyuk I., Pozdniakov P. (2017). Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. *Technology Audit and Production Reserves*. №4/2(36) (2017)., 44–49. [in Ukrainian] DOI:10.15587/2312-8372.2017.108537.
7. Jones M., Djahel S., Welsh K. (2023). Path-Planning for Unmanned Aerial Vehicles with Environment Complexity Considerations: A Survey. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 55, № 11. P. 234:1-234:39. DOI:10.1145/3570723
8. Cabreira T. M., Brisolara L. B., Ferreira Jr. P. R. (2019). Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones*. 2019. Vol.3, № 1. DOI: 10.3390/drones3010004
9. Семенюта М.Ф., Осадчий С.І., Чесак О. Системний підхід до моніторингу територій з використанням рою БПЛА. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей XII Міжнар. наук.-практ. конф., 10-12 грудня*

2024. р., м. Запоріжжя. [Електронний ресурс] /Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. С. 459-463.
10. Гуляницький Л.Ф., Рибальченко О.В. Оптимізація маршрутів при плануванні місії гібридних транспортних систем «дрон+транспортний засіб». *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2023. №3 (2023). С. 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4
 11. Uddin F., Riaz N., Manan A., Mahmood I., Song Oh-Y., Malik A. J., Abbasi A. A. (2023). An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. *Applied Sciences*. Vol. 13(12) (2023). DOI: 10.3390/app13127339
 12. Lin S., Kernighan B.W. An effective heuristic algorithm for the travelling salesman problem. *Operations Research*. 1973. Vol. 21, № 2. P. 498–516. <https://www.cs.princeton.edu/~bvk/btl.mirror/tsp.pdf>
 13. Ahmed M. R., Shibli A. A.I, Marhaban M. H., Kaiser M. S., Myo T., Albroumi B. (2023). Ant Colony Optimization-Based Path Planning for UAV Navigation in Dynamic Environments. *The 7-th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR)* August 4-6 2023, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023. P.168-173.
 14. Murugananthan V., Rehan M. Y. E. S., Srinivasan R., Kavitha M., Kavitha R. (2023). Traveling Salesman Problem with Ant Colony Optimization. 2-nd *International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*. 2023. DOI: 10.1109/ICECAA58104.2023.10212262
 15. Flores-Caballero G., Rodríguez-Molina A., Aldape-Pérez M., Villarreal-Cervantes M. G. (2020). Optimized Path-Planning in Continuous Spaces for Unmanned Aerial Vehicles Using Meta-Heuristics. *IEEE Access*. Vol.8. 2020. P.176774-176788. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026666
 16. Yin Y., Wang Z., Zheng L., Su Q., Guo Y. (2014). Autonomous UAV Navigation with Adaptive Control Based on Deep Reinforcement Learning. *Electronics*. 2024, 13(13). DOI: 10.3390/electronics13132432
 17. Bose S., Maheswaran N., Logeswari G., Anitha T., Prabhu D., Gokulraj G. (2024). Adaptive Deep Learning Techniques for Real-Time Shortest Path Optimization in Drone Ambulance Operations during Disaster. *8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. DOI: 10.1109/I-SMAC61858.2024.10714626.
 18. Zhang C., Feng Q. (2020). Research on UAV Path Planning Combined with Ant Colony and A*. *IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. 2020. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084730.

References

1. Berezhnyi, A. O. (2020). *Methods and information technology for automated flight route planning of unmanned aerial vehicles to improve object search efficiency*. Candidate's thesis. Kharkiv: Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub [in Ukrainian].
2. Vadis, D., & Avrutov, V. (2024). Methods for improving the functional efficiency of UAVs. *Mekhanika gyroskopichnykh system*, 48, 55–68. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891> [in Ukrainian].
3. Sonmez A., Kocyigit E., Kugu E. (2015). Optimal path planning for UAVs using genetic algorithm. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. June 9-12, 2015. Denver Marriott Tech Center Denver, Colorado, USA, 2015. P.50-55. DOI: 10.1109/ICUAS.2015.7152274
4. Wang H., Pan W. (2021) Research on UAV Path Planning Algorithms. *8-th Annual International Conference on Geo-Spatial Knowledge and Intelligence IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 693. 2021. DOI:10.1088/1755-1315/693/1/012120
5. Jiang Y., Xu X.-X., Zheng M.-Y., Zhan Z.-H. (2024). Evolutionary computation for unmanned aerial vehicle path planning: a survey. *Artificial Intelligence Review*. 2024 Vol. 57, № 10. DOI: 10.1007/s10462-024-10913-0
6. Vorotnikov V., Gumenyuk I., Pozdniakov P. (2017). Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. *Technology Audit and Production Reserves*. №4/2(36) (2017), 44–49. [in Ukrainian] DOI:10.15587/2312-8372.2017.108537.
7. Jones M., Djahel S., Welsh K. (2023). Path-Planning for Unmanned Aerial Vehicles with Environment Complexity Considerations: A Survey. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 55, № 11. P. 234:1-234:39. DOI:10.1145/3570723
8. Cabreira T. M., Brisolara L. B., Ferreira Jr. P. R. (2019). Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones*. 2019. Vol.3, № 1. DOI: 10.3390/drones3010004
9. Semeniuta, M.F., Osadchy, S.I., & Chesak, O. (2024). A systems approach to area monitoring using a swarm of UAVs. In *Modern problems and achievements in radio engineering, telecommunications and*

- information technologies: Abstracts of the 12th International Scientific and Practical Conference (Zaporizhzhia, December 10–12, 2024), (pp. 459–463). Zaporizhzhia: National University “Zaporizhzhia Polytechnic”. [in Ukrainian].
10. Huliantskyi, L.F., & Rybalchenko, O.V. (2023). Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. *Kibernetika ta kompiuterni tekhnolohii*, 3, 44–58. [in Ukrainian]. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4
 11. Uddin F., Riaz N., Manan A., Mahmood I., Song Oh-Y., Malik A. J., Abbasi A. A. (2023). An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. *Applied Sciences*. Vol. 13(12) (2023). DOI: 10.3390/app13127339
 12. Lin S., Kernighan B.W. An effective heuristic algorithm for the travelling salesman problem. *Operations Research*. 1973. Vol. 21, № 2. P. 498–516. <https://www.cs.princeton.edu/~bvk/btl/mirror/tsp.pdf>
 13. Ahmed M. R., Shibli A. A.I, Marhaban M. H., Kaiser M. S., Myo T., Albroumi B. (2023). Ant Colony Optimization-Based Path Planning for UAV Navigation in Dynamic Environments. *The 7-th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR)* August 4-6 2023, Kuala Lumpur, Malaysia,. 2023. P.168-173.
 14. Muruganathan V., Rehan M. Y. E. S., Srinivasan R., Kavitha M., Kavitha R. (2023). Traveling Salesman Problem with Ant Colony Optimization. 2-nd *International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*. 2023. DOI: 10.1109/ICECAA58104.2023.10212262
 15. Flores-Caballero G., Rodríguez-Molina A., Aldape-Pérez M., Villarreal-Cervantes M. G. (2020). Optimized Path-Planning in Continuous Spaces for Unmanned Aerial Vehicles Using Meta-Heuristics. *IEEE Access*. Vol.8. 2020. P.176774-176788. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026666
 16. Yin Y., Wang Z., Zheng L., Su Q., Guo Y. (2014). Autonomous UAV Navigation with Adaptive Control Based on Deep Reinforcement Learning. *Electronics*. 2024, 13(13). DOI: 10.3390/electronics13132432
 17. Bose S., Maheswaran N., Logeswari G., Anitha T., Prabhu D., Gokulraj G. (2024). Adaptive Deep Learning Techniques for Real-Time Shortest Path Optimization in Drone Ambulance Operations during Disaster. *8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. DOI: 10.1109/I-SMAC61858.2024.10714626.
 18. Zhang C., Feng Q. (2020). Research on UAV Path Planning Combined with Ant Colony and A*. *IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. 2020. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084730.

Maryna Semeniuta¹, Assoc. Prof., PhD phi-math. sci., Serhii Yakymenko¹, Assoc. Prof., PhD phi-math. sci., Serhii Osadchy², Prof., DSc. of tech. sci.

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Ukrainian State Flight Academ, Kropyvnytskyi, Ukraine

Optimal Route Planning of Unmanned Aerial Vehicles for Efficient Coverage of a Given Area

This article addresses the problem of optimizing routes for unmanned aerial vehicles (UAVs) for the inspection of solar panels, which is a specific case of the Traveling Salesman Problem on a complete graph. The aim of the work is to develop a mathematical model for planning UAV routes with the minimization of route length and energy consumption, while ensuring complete coverage of all inspection points.

A program has been developed that implements a UAV routing model, taking into account energy consumption constraints. Four algorithms were applied to solve the problem: greedy algorithm, 2-opt, Ant Colony Optimization, and Genetic Algorithm. Each method was evaluated based on three criteria: execution speed, route length, and energy efficiency.

The experimental results showed that the greedy algorithm is the fastest, but it yields less optimal routes compared to other methods. The 2-opt algorithm did not provide satisfactory results due to a significant increase in energy consumption and route length. The Ant Colony Optimization and Genetic Algorithms showed the best results, providing optimal routes in terms of energy efficiency and minimization of path length.

As a result of the analysis, it can be argued that the choice of algorithm depends on the specific requirements of the problem. For quickly obtaining an initial solution, it is advisable to use the greedy algorithm, for local optimization – the 2-opt algorithm, and for achieving the best results in minimizing energy consumption and route length – the Ant Colony Optimization or Genetic Algorithms.

UAV, travelling salesman problem, greedy method, 2-opt algorithm, ant algorithm, genetic algorithm, graph

Одержано (Received) 09.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.05.2025

УДК 004.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.44-57](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.44-57)О. С. Улічев¹, канд. техн. наук, В. П. Кулагін²¹Центральноукраїнський національний технічний університет м. Кропивницький, Україна²Приватний вищий навчальний заклад "Європейський університет", м. Київ, Україна

e-mail: askin79@gmail.com, victor@kulagin.com.ua

Оптимізація роботи мікросервісів на основі теорії ігор

Завдяки високій гнучкості та здатності до масштабування мікросервісна архітектура стала актуальним і популярним підходом у розробці сучасних програмних систем. Водночас її застосування ставить нові завдання, пов'язані з керуванням ресурсами та забезпеченням стабільної якості обслуговування. У цій статті запропоновано підхід до оптимізації роботи мікросервісів на основі теорії ігор. Запропоновано модель, в якій кожен мікросервіс розглядається як гравець, що прагне оптимізувати власну вигоду (наприклад, мінімізувати час відповіді) при спільному використанні обмежених ресурсів. Використовуючи концепцію рівноваги Неша, розроблено Game Theory Controller - контролер, що обчислює оптимальний розподіл ресурсів між мікросервісами. Наведено математичну модель такої гри, псевдокод алгоритму пошуку рівноваги, а також архітектурну схему інтеграції контролера в систему оркестрації контейнерів. Експериментальні результати моделювання демонструють, що запропонований підхід дозволяє збалансувати навантаження між сервісами та зменшити середній час відповіді системи у порівнянні з традиційними стратегіями (наприклад, Binpack та Spread). У висновках обговорено доцільність застосування теорії ігор для керування мікросервісами та окреслено напрями подальших досліджень.

мікросервісна архітектура, оптимізація, теорія ігор, рівновага Неша, розподіл ресурсів, відмовостійкість, оркестрація, якість обслуговування (QoS)

Постановка проблеми. Перехід від монолітної архітектури до набору мікросервісів породжує ряд проблем. Зокрема, керування ресурсами (процесорним часом, пам'яттю, пропускнуою здатністю мережі тощо) у середовищі з великою кількістю сервісів стає складнішим завданням. Кожен сервіс має власні вимоги до ресурсів і показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS), а ресурси інфраструктури обмежені. Якщо ресурси розподілено неефективно, може погіршитися час відповіді сервісів, зрости кількість відмов запитів або порушитися угоди про рівень сервісу (Service Level Agreement, SLA). Традиційні підходи до керування ресурсами у хмарних середовищах (наприклад, статичне виділення ресурсів, евристики на кшталт Binpack та Spread для розміщення контейнерів) не завжди забезпечують оптимальну продуктивність для мікросервісних застосунків. Відтак постає проблема динамічної оптимізації розподілу ресурсів між мікросервісами з урахуванням їх поточного стану та навантаження. Необхідно забезпечити, щоб жоден сервіс не страждав від дефіциту ресурсів, коли інші простоюють, і водночас уникнути ситуації, коли всі сервіси одночасно агресивно споживають ресурси, заважаючи один одному.

Таким чином, формулювання проблеми зводиться до наступного: як координувати розподіл спільних обчислювальних ресурсів між незалежними мікросервісами, які одночасно співпрацюють задля виконання загальної бізнес-логіки та конкурують за ресурси, з метою оптимізації глобальних показників системи (пропускнуої здатності, середнього часу відповіді, кількості оброблених запитів) при дотриманні локальних цілей кожного сервісу, зокрема їхніх QoS-вимог. Цю задачу пропонується вирішувати із залученням апарату теорії ігор, математичного інструментарію для аналізу поведінки множини раціональних агентів (гравців), інтереси яких частково

співпадають, а частково суперечать один одному.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мікросервісна архітектура характеризується розподілом застосунку на набір дрібних незалежно розгорнутих сервісів, що спілкуються між собою через чітко визначені інтерфейси. Такий підхід дозволяє спростити розробку та масштабування складних систем, підвищити стійкість до збоїв та прискорити випуск оновлень. У попередній статті було розглянуто мікросервісну архітектуру, як сучасний підхід до розробки програмного забезпечення, який відповідає щоразу вищим вимогам бізнесу та технологій, розглянуто її переваги та недоліки в порівнянні з іншими архітектурами [1]. За даними досліджень, мікросервіси набули значного поширення в індустрії програмного забезпечення завдяки можливості горизонтального масштабування та ізоляції компонентів [2]. Протягом останніх десятиліть теорія ігор демонструвала ефективність у розв'язанні задач оптимального розподілу ресурсів в обчислювальних системах. Ще з 2000-х років науковці активно використовували ігрові моделі для опису процесів керування мережами та дата-центрами, де окремі вузли або користувачі розглядаються як гравці, що прагнуть покращити власні показники за допомогою вибору стратегій. Е. Altman та інші [3] навели огляд застосування теорії ігор у телекомунікаційних мережах, продемонструвавши ефективність граничної рівноваги в задачах керування трафіком та мережевих ресурсів. У сфері хмарних обчислень одним із перших прикладів використання теорії ігор є дослідження G. Wei та співавторів [4], де було запропоновано ігрову модель для справедливого розподілу обчислювальних ресурсів між користувачами. Такий підхід дозволив враховувати інтереси всіх сторін і досягати рівноваги Неша.

У свою чергу, D. Ardagna з колегами [5] використали узагальнену модель рівноваги Неша для вирішення задач, пов'язаних із наданням хмарних сервісів, де кілька провайдерів одночасно прагнули підвищити власний прибуток, не знижуючи рівень обслуговування клієнтів. Ці дослідження заклали основу для використання ігрових моделей у системах розподілених обчислень.

З поширенням контейнеризації та мікросервісів науковці почали звертати увагу на специфічні виклики, пов'язані з динамічним характером таких систем. Керування ресурсами на рівні контейнерів (microservice resource management) суттєво відрізняється від традиційного керування віртуальними машинами, оскільки одиниць розгортання (контейнерів/сервісів) набагато більше, а їх життєвий цикл коротший. У ряді праць було запропоновано застосувати теоретико-ігрові методи безпосередньо до середовища мікросервісів та fog/edge-інфраструктури (обчислення на периферії мережі). Наприклад, К. Кауг та інші [7] сконструювали багатокритерійну функцію корисності для сервісів на основі моделі кооперативної гри, щоб збалансувати енергоспоживання та доступність сервісів у так званих нано-центрах обробки даних на краю мережі. У їхньому підході контейнери з мікросервісами розгортаються на вузлах туманних обчислень (fog computing), а сервіс вибирає стратегію, що оптимізує одночасно час виконання завдань і енергоспоживання пристроїв, досягаючи компромісу між ефективністю та надійністю роботи.

Інший приклад - S. Yan та співавтори [8], які розглянули гру між користувачами та точками доступу у туманній радіомережі (Fog Radio Access Network, F-RAN). Вони запропонували еволюційну гру для вибору режиму доступу: користувачі вирішують, відправляти трафік безпосередньо на базову станцію чи на локальний вузол обчислень, на основі виграшу в пропускній здатності та затримці. Встановлено, що така гра сходиться до еволюційної рівноваги, яка максимізує ефективність використання мережевих і обчислювальних ресурсів F-RAN. Хоча ця робота стосується мережевого

рівня, вона демонструє підхід, коли множина агентів (користувачів) самоорганізується через локальні рішення в глобально оптимальний або наближений до оптимального стан.

Безпосередньо до проблем оптимізації мікросервісних runtime-середовищ теорію ігор застосували R. Luo та інші [9]. Вони відзначили, що мікросервіси в межах одного застосунку співпрацюють для обслуговування запитів (через виклики API один одного), але водночас можуть конкурувати за спільні ресурси сервера або кластера, особливо при піковому навантаженні. Автори змоделювали цю ситуацію як конгестивну гру (congestion game): кожен мікросервіс (гравець) прагне максимізувати свій дохід, який визначається рівнем дотримання вимог SLA (наприклад, штрафи за перевищення часу відповіді). Якщо надто багато сервісів одночасно споживають один і той самий ресурс (CPU, пам'ять), їхній індивідуальний виграш зменшується через ріст часу обробки - це явище «конгестії» (перевантаження). У моделі R. Luo для кожного сервісу визначено функцію корисності (доходу) θ_i , що лінійно спадає зі збільшенням часу відповіді r_i на його запити:

$$\theta_i = v_i + m_i r_i, m_i < 0 \quad (1)$$

де v_i - базовий дохід (коли час відповіді прямує до нуля), m_i - коефіцієнт “штрафу” за затримку (від’ємне значення), а r_i - час відповіді.

Таким чином, чим довше час відповіді сервісу i , тим менше θ_i , тобто сервіс зацікавлений мінімізувати власний час обслуговування. Весь набір сервісів формує гру, де стратегія кожного гравця полягає у виборі деякого розподілу своїх запитів по наявних ресурсах (наприклад, по різних вузлах кластера). R. Luo та інші довели, що ця гра належить до класу потенційних ігор (potential games), для яких гарантовано існування щонайменше однієї чистої рівноваги Неша. Вони запропонували алгоритм поліноміального часу для знаходження такої рівноваги, фактично реалізований у вигляді компонента-контролера, що збирає інформацію про поточні навантаження сервісів і рекомендує їм оптимальний розподіл запитів між ресурсами. Експериментально показано, що їхній підхід перевершує за ефективністю стандартні політики Docker Swarm (Binpack і Spread): середній час відповіді запитів зменшився, а кількість відмов (через тайм-аут) - теж суттєво нижча при використанні ігрового розподілу ресурсів [9].

На додачу до згаданих робіт, є низка інших досліджень, де теорію ігор застосовано для споріднених завдань оптимізації в edge/cloud-системах. Q. He та співавтори [10] розробили ігрову модель для розподілу користувачів між кількома крайовими вузлами, щоб максимізувати виграш як користувачів, так і провайдерів послуг на краю мережі. Їхній підхід дозволяє динамічно залучати нові крайові сервери або вивільняти існуючі, встановлюючи рівновагу між навантаженням і вартістю обслуговування.

S. Kumar [11] з колегами сфокусувалися на багатоорендарних (multi-tenant) середовищах на краю інтернету речей: вони застосували некооперативну гру для ціноутворення ресурсів, аби стимулювати провайдерів edge-хмар підвищувати коефіцієнт використання своїх серверів без шкоди для QoS сервісів. Розв'язання задачі Edge Resource Allocation у них досягається через обчислення рівноважних цін на ресурси, за яких жоден провайдер і жоден споживач (сервіс) не виграє від односторонньої зміни своєї стратегії (ціни чи обсягу ресурсів). Варто відзначити, що

теорія ігор застосовується не лише для оптимізації продуктивності та витрат, але й для забезпечення надійності та безпеки в мікросервісних системах. Зокрема, існують роботи, де ігрові моделі використовуються для протидії кібератакам (наприклад, розподіленим атакам типу відмова в обслуговуванні на краю мережі) шляхом знаходження рівноважних стратегій між атакувальниками та захисними мікросервісами [12]. Проте в контексті даної статті основну увагу приділено саме оптимізації розподілу обчислювальних ресурсів і забезпеченню якості обслуговування.

Окрім підходів на основі теорії ігор, в літературі запропоновано й інші методи оптимізації мікросервісних архітектур. Так, K. Velasquez та інші [14] досліджували задачу розміщення сервісів (service placement) в інфраструктурі Інтернету речей. Вони мінімізували затримку мережі між датчиками та сервісами шляхом вибору оптимальних вузлів для їх розміщення. Хоча їхній метод зменшує кількість «стрибків» (hop count) в мережі та тим самим затримку, він не враховує обмеженість обчислювальних ресурсів на вузлах. Це може призвести до перевантаження певних вузлів при великій кількості сервісів.

L. Baresi з колегами [15] запропонували підхід, заснований на теорії керування: вони розробили дискретний регулятор зі зворотним зв'язком, який динамічно змінює кількість запущених контейнерів з мікросервісами або виділені їм ресурси, виходячи з відхилення показників QoS від цільових значень. Такий підхід забезпечує стабілізацію часу відповіді сервісів, проте вимагає ретельного налаштування контролера та моделей системи.

C. Guerrero та інші [16] застосували методи метавристичної оптимізації (генетичні алгоритми) для розподілу контейнерів у мультихмарному середовищі: їхня мета зменшити час реакції застосунку та вартість оренди хмарних ресурсів шляхом знаходження майже оптимального розподілу сервісів між декількома хмарними провайдерами. Подібні підходи можуть досягати хороших результатів, але зазвичай потребують значного обчислювального часу для пошуку рішення і не гарантують глобальної оптимальності. Попередні дослідження продемонстрували, що теорія ігор може бути дієвим інструментом для оптимізації різних аспектів роботи розподілених систем, від хмарних технологій до туманних обчислень і мікросервісної архітектури. Водночас, проблема цілісного управління ресурсами в межах мікросервісної системи (на рівні контейнерів і сервісної оркестрації) залишається відкритою і потребує подальшого дослідження. Лише декілька праць безпосередньо адресують конкурентний розподіл ресурсів між мікросервісами одного застосунку. Необхідне рішення, яке б у режимі реального часу балансувало потреби багатьох сервісів та приводило систему до стану, близького до соціального оптимуму (оптимуму для всього застосунку), враховуючи при цьому егоїстичні інтереси окремих сервісів. Саме тому в даній статті ставиться задача розробити підхід, що використовує теорію ігор для оптимізації мікросервісної архітектури, та продемонструвати його реалізацію і переваги.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування мікросервісної архітектури шляхом розробки ігрової моделі розподілу обчислювальних ресурсів між сервісами та відповідного контролера для її реалізації. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання.

1. Формалізувати ситуацію спільного користування ресурсами як некооперативну гру: визначити множину гравців (мікросервісів), їхні стратегії (параметри використання ресурсів, наприклад, доля CPU або кількість інстансів, що запускаються), та функції виграшу (утиліти), які відображають якість роботи сервісів. Модель має враховувати як колаборативні аспекти (ланцюжки викликів між сервісами, спільне виконання запиту), так і конфліктні (конкуренція за CPU, пам'ять).

2. Обґрунтувати, що оптимальний на думку кожного окремого сервісу розподіл ресурсів (стратегія) приводить систему до рівноваги Неша, стану, в якому жоден сервіс не може поліпшити свій показник, односторонньо змінивши стратегію [9]. В ідеалі цей стан має відповідати близькому до глобального оптимуму розподілу ресурсів. Слід дослідити існування та єдиність рівноваги, використовуючи, наприклад, апарат потенційних ігор [13].

3. Розробити ефективний алгоритм, що знаходить (або наближує) рівноважний розподіл ресурсів між сервісами. Це може бути ітераційний процес покращення стратегій (так званий алгоритм найкращої відповіді), або ж пряме розв'язання оптимізаційної задачі, еквівалентної грі. Важливо забезпечити збіжність алгоритму за прийнятне число кроків навіть при великій кількості сервісів.

4. Спроектувати компонент Game Theory Controller - програмний модуль, що інтегрується в існуючу систему оркестрації (наприклад, у Kubernetes або Docker Swarm) і виконує функції:

- збір метрик роботи сервісів (частота запитів, час відповіді, використання CPU/пам'яті);
- вирішення ігрової моделі (обчислення нової рівноважної конфігурації);
- застосування змін (масштабування сервісів, перенаправлення навантаження, встановлення лімітів ресурсів).

Необхідно продумати, як контролер взаємодіятиме з оркестратором через його API, і забезпечити, щоб ця взаємодія не створювала великого оверхеду.

5. Змоделювати або реалізувати прототип системи з Game Theory Controller та порівняти його поведінку з базовими стратегіями (без оптимізації). Для достовірності бажано використати сценарії різного навантаження та конфігурацій сервісів. Показниками ефективності мають бути середній час відповіді, пропускна здатність (кількість успішно оброблених запитів за секунду), кількість порушень SLA тощо.

Результатом вирішення цих завдань має стати науково обґрунтований та перевірений підхід до оптимізації мікросервісної архітектури, який демонструє переваги над існуючими евристичними підходами.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо застосунок, реалізований у вигляді набору мікросервісів $S = 1, 2, \dots, n$, що працюють у спільному оточенні (кластері контейнерів). Нехай маємо скінченну множину ресурсів $R = 1, 2, \dots, R$, наприклад, обчислювальні вузли або абстрактні ресурси на кшталт CPU-часу. Кожен мікросервіс $i \in S$ отримує потік запитів із певною інтенсивністю λ_i (залежить від загального вхідного навантаження та бізнес-логіки). Якщо ресурсів достатньо, сервіс обробляє запити з середнім часом r_i , який зростає при перевантаженні. Мікросервіси можуть викликати один одного: припустимо, існує певний граф викликів між сервісами (наприклад, сервіс автентифікації викликається кількома іншими сервісами тощо). Проте для спрощення моделі припустимо, що ключовий вплив на продуктивність сервісу мають виділені йому ресурси, а не черги викликів - це вплив можна врахувати у функції корисності як ваговий коефіцієнт важливості сервісу.

Запропонуємо функцію корисності (виграшу) для мікросервісу i :

$$\theta_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iR}) \quad (2)$$

показник ефективності роботи сервісу i , що залежить від розподілу ресурсів x_{iR} , які він отримує від кожного ресурсу $i \in S$.

Ця функція повинна відображати, наскільки добре сервіс i задовольняє свої SLA-вимоги. Один із варіантів, аналогічно до роботи R. Luo [9] - визначити θ_i через рівень виконання сервісом i цільового часу відповіді.

1. Встановимо бажаний максимальний час відповіді $T_i^{(SLA)}$ для сервісу i згідно SLA.

2. Нехай фактичний середній час відповіді r_i є функцією від виділеного ресурсу (або ресурсів). Якщо сервіс отримує більше CPU або більше екземплярів запущено, r_i зменшується.

3. Оцінимо виграш як штраф за перевищення часу:

$$\theta_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } r_i \leq T_i^{(SLA)} \\ \frac{T_i^{(SLA)}}{r_i}, & \text{якщо } r_i > T_i^{(SLA)} \end{cases} \quad (3)$$

$\theta_i = 1$, якщо SLA виконується, і менше 1, якщо сервіс працює повільніше пропорційно до погіршення.

Інший підхід - задати θ_i як дохід сервісу, який він приносить, з урахуванням штрафів за поганий QoS [9]. Наприклад, дохід сервісу i може бути пропорційним кількості успішно оброблених запитів (що обернено пропорційна до r_i) мінус штрафи за кожен запит, що перевищив допустимий час або був втрачений.

Незалежно від конкретної форми θ_i , властивість буде спільною: θ_i монотонно спадає зі зменшенням виділених сервісу ресурсів (або з ростом навантаження при фіксованих ресурсах). Мікросервіс зацікавлений максимізувати θ_i .

Тепер формулюємо гру:

$$G = \langle S, \sum_i i \in S, \theta_i i \in S \rangle \quad (4)$$

гравці: мікросервіси $i \in S$, стратегії: $\sum_i$ - множина можливих стратегій сервісу i .

Стратегія визначає, як сервіс розподіляє своє навантаження або запити по наявних ресурсах. Наприклад, якщо є R однакових вузлів, стратегія може задавати число інстансів сервісу i на кожному з вузлів (вектор $(x_{i1}, \dots, x_{iR})$, де $x_{ir} \geq 0$ і $\sum_r x_{ir} = N_i$ - загальне число контейнерів сервісу i). Або стратегія - це вибір одного з вузлів, на якому виконуватиметься сервіс (тоді $\sum_i$ - дискретна множина вузлів). У випадку спільного CPU-часу стратегія може бути безперервною: який пріоритет або долю CPU вимагати.

Функція виграшу:

$$\theta_i(\sigma_i, \sigma_{-i}) \quad (5)$$

де $\sigma_i \in \sum_i$ - стратегія гравця i , а σ_{-i} - профіль стратегій всіх інших.

Виграш i залежить не лише від його власної стратегії, а й від стратегій інших, бо вони впливають на загальне навантаження кожного ресурсу. Наприклад, якщо сервіси 1 і 2 розміщені на одному вузлі, їхній час відповіді зросте для обох через спільне використання CPU - це і є взаємодія стратегій.

У багатьох задачах такого типу зручно розглядати потенційну функцію $P(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, зміна якої від стратегії окремого гравця пропорційна зміні його виграшу [13]. Інтуїтивно, потенційна функція тут може відображати «загальне задоволення системи» розподілом ресурсів. Якщо гра є потенційною, то пошук рівноваги Неша можна звести до задачі оптимізації P , що значно спрощує рішення. У нашій постановці функцію P можна визначити, наприклад, як сумарний показник SLA-виконання всіма сервісами.

Профіль стратегій $\sigma^* = (\sigma_1^*, \sigma_2^*, \dots, \sigma_n^*)$ називається рівновагою Неша, якщо для будь-якого сервісу i виконується нерівність:

$$\theta_i(\sigma_i^*, \sigma_{-i}^*) \geq \theta_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^*) \forall \sigma_i \in \Sigma_i \quad (6)$$

Тобто жоден гравець не може односторонньо покращити свій виграш, змінюючи стратегію на іншу, якщо стратегії решти зафіксовані. У контексті ресурсів це означає: якщо всі інші сервіси зберігають свої частки ресурсів, жодному сервісу немає сенсу захопити більше ресурсів чи віддати частину, його власний показник θ_i від цього не покращиться. Рівновага Неша є природним кандидатом на стан системи, до якого вона може дійти шляхом самоорганізації сервісів.

У нашій грі рівновага може інтерпретуватися як стабільний розподіл ресурсів. На відміну від централізованого оптимального розподілу (коли, наприклад, ми максимізуємо $\sum_i \theta_i$ глобально), рівновага Неша досягається локально раціональними

діями кожного сервісу. В ідеалі, якщо гра сконструйована вдало, така рівновага буде або співпадати з соціально-оптимальним станом, або принаймні знаходитися близько до нього за значенням потенційної функції. Відомо, що для потенційних ігор простий алгоритм послідовного поліпшення стратегій (де гравці по черзі переходять до стратегій, які покращують їхній виграш) гарантовано збігається до рівноваги Неша за скінченне число кроків [13].

На основі викладеної моделі можна запропонувати алгоритм, що наближує рівновагу Неша, дозволяючи мікросервісам поступово «домовитися» про розподіл ресурсів. В основі цього алгоритму лежить стратегічна гра між агентами.

Формальне позначення найкращої відповіді (best response) гравця (або мікросервісу) i на фіксовані стратегії інших гравців у певний момент часу відображено у наступному виразі:

$$\sigma_i^{best} := \arg \max_{\sigma_i \in \Sigma_i} \theta_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^{t-1}) \quad (7)$$

σ_i^{best} - Найкраща стратегія для гравця i , $\arg \max$ - аргумент, на якому досягається максимум, $\theta_i(\cdot)$ - функція виграшу (корисності) гравця i , $\sigma_i \in \Sigma_i$ - множина всіх можливих стратегій гравця i , $\sigma_i, \sigma_{-i}^{t-1}$ - стратегії всіх інших гравців на попередній ітерації $t-1$.

Вхідними даними для алгоритму є: множина мікросервісів S , множина доступних ресурсів R , початковий розподіл $x^0 = x_{ir}^0$. Вихідними - рівноважний розподіл $x^* = x_{ir}^*$.

На початковому етапі встановлюється базовий розподіл ресурсів, наприклад, рівномірний, або з урахуванням попередньої статистики навантаження.

Далі система переходить до циклічного оновлення стратегій кожного сервісу. На кожній ітерації t кожен сервіс $i \in S$, знаючи поточний стан системи, визначає - чи може він покращити свій виграш, змінивши стратегію. Якщо може, сервіс переходить до нової стратегії. На основі цього обчислення сервіс обирає найкращу відповідь, згідно з виразом 7.

Нове значення розподілу встановлюється відповідно до обраної стратегії, тоді як стратегії інших сервісів залишаються незмінними, $x_{i*}^{(t)} := \sigma_i^{best}$, при $x_{j*}^{(t-1)} := x_{j*}^{(t-1)}$.

Процес повторюється, доки на черговій ітерації жоден із сервісів не знаходить для себе кращої стратегії, тобто система досягає рівноваги, $x^{(t)} = x^{(t-1)}$.

Алгоритм гарантовано завершується, оскільки кількість можливих станів системи (профілів стратегій) скінченна, а кожна ітерація покращує значення потенційної функції P або залишає його незмінним, а в потенційній грі не може бути нескінченного циклу покращень [13].

Звісно, наведений алгоритм - централізована (синхронна) версія (ми послідовно перебираємо сервіси). У реальній системі можна реалізувати його асинхронно: кожен сервіс (або агент, що діє від його імені) періодично перевіряє умови і за потреби коригує свій ресурсний запит. Самі обчислення оптимальної відповіді можуть виконуватись аналітично (якщо, скажімо, взяти похідну від θ_i і прирівняти до нуля, знайти оптимум) чи методом перебору (якщо простір стратегій дискретний і невеликий).

Для впровадження описаного підходу у середовище контейнерів розроблено компонент Game Theory Controller (GTC), що діє як надбудова до системи оркестрації (наприклад, Kubernetes). На рисунку 1 зображено схему архітектури з GTC. Контролер виконує роль «арбітра», який збирає інформацію про стан кожного мікросервісу (навантаження, поточний час відповіді, використання ресурсів) та обчислює новий розподіл ресурсів, керуючись ігровою моделлю.

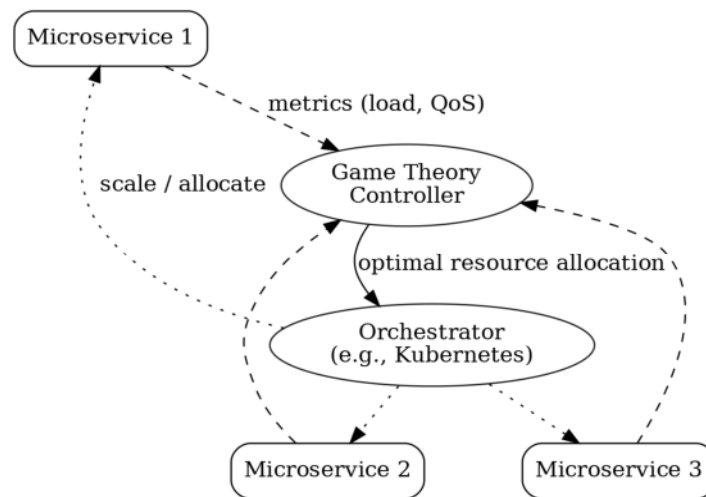


Рисунок 1 – Архітектура мікросервісної системи з контролером Game Theory Controller

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рисунка 1, Game Theory Controller отримує метрики (показники навантаження, latency тощо) від моніторингової системи (яка може бути частиною платформи оркестрації або окремим агентом в кожному контейнері). На основі цих даних контролер розв'язує ігрову задачу: знаходить рівноважний розподіл ресурсів між

сервісами. Потім через API оркестратора контролер застосовує необхідні зміни в кластері.

Це може включати:

1. Масштабування окремих сервісів (збільшення або зменшення кількості реплік контейнера).

2. Міграцію контейнерів на інші вузли (якщо гра передбачає, що для рівноваги певний сервіс повинен працювати на іншому ресурсі).

3. Динамічне налаштування лімітів на ресурси (CPU, пам'ять) для контейнерів, що дозволяє контролювати, яку частку доступних ресурсів може використовувати кожен окремий сервіс.

Контролер працює у режимі замкнутого зворотного зв'язку: після кожної зміни він знов отримує оновлені метрики і перевіряє, чи система досягла стабільності. Якщо виявляється, що після перерозподілу якийсь сервіс почав отримувати гірший виграш (наприклад, через зміну характеру трафіку), процес продовжується - фактично, алгоритм 1 виконується у режимі реального часу, покроково наближаючи систему до рівноваги при поточному навантаженні.

У Kubernetes можна реалізувати GTC як кастомний контролер (operator), що взаємодіє з API Server. Наприклад, контролер може періодично збирати метрики з Prometheus (система моніторингу) і на їх основі розраховувати нові значення Replica Count для кожного Deployment (мікросервісу), або ж змінювати CPU requests/limits у Pod-ах. Розрахунок може виконуватися поза межами самого кластера (контролер як зовнішній сервіс) або всередині (у вигляді спеціального Pod-a).

Розглянемо спрощений сценарій: два мікросервіси (A і B) працюють на спільному кластері з двома вузлами. Сервіс A є критичнішим (його SLA жорсткіше, йому бажано низький час відповіді), сервіс B - менш чутливий. Припустимо, спочатку оркестратор розмістив обидва сервіси на одному вузлі. Внаслідок цього при високому навантаженні час відповіді A і B зріс, і A може порушувати SLA. Контролер отримує такі дані і «грає» за сервіс A, рекомендуючи йому стратегію, перенести деякі свої копії на другий вузол (або збільшити кількість копій, зайнявши другий вузол). Сервіс B, навпаки, може трохи зменшити свою частку CPU на першому вузлі або також запустити копію на другому. Після застосування, сервіс A отримав більше ресурсу ексклюзивно, його час відповіді повернувся в межі SLA, сервіс B теж працює прийнятно.

Жоден з них тепер не бажає змінювати розміщення - досягнуто рівноваги: A не хоче повертатися на спільний вузол з B, бо йому там гірше, а B не проти залишити A більше ресурсів, бо його власний показник при цьому все ще задовільний.

Така конфігурація відповідає інтуїтивному очікуванню: більш критичний сервіс отримав пріоритетний доступ до ресурсів.

Щоб оцінити вплив запропонованого підходу, корисно порівняти його результати з двома базовими політиками керування ресурсами, які часто застосовуються в оркестрації контейнерів: Binpack та Spread. Binpack прагне мінімізувати кількість зайнятих вузлів (щільно упаковуючи контейнери), а Spread - рівномірно розподілити навантаження між усіма вузлами. Game Theory Controller фактично намагається збалансувати інтереси сервісів з урахуванням поточного навантаження, що може нагадувати щось середнє між Binpack і Spread, але адаптивно.

У таблиці 1 підсумовано основні особливості цих стратегій.

Таблиця 1 – Порівняння стратегій розподілу ресурсів

Стратегія	Підхід	Переваги	Недоліки
Binpack	Максимально щільне розміщення сервісів на найменшій кількості вузлів.	Високе завантаження окремих вузлів, можливість вимкнути незалучені вузли для економії ресурсів.	Ризик перевантаження вузлів, погіршення продуктивності при піковому навантаженні; нерівномірний розподіл може призвести до гарячих точок.
Spread	Рівномірний розподіл сервісів по всіх доступних вузлах.	Уникає концентрації навантаження на одному вузлі, стабільний час відповіді при помірному навантаженні.	Недовикористання ресурсів: навіть при малому навантаженні залучені всі вузли (накладні витрати); може збільшувати міжвузлові затримки через розподіл сервісів.
Game Theory (з GTC)	Мікросервіси самостійно вибирають розподіл ресурсів, оптимальний для їх продуктивності (рівновага).	Адаптивний баланс ресурсів відповідно до актуальних потреб; поліпшення загальної продуктивності та справедливості (жоден сервіс не “обділений”).	Складність реалізації: потребує спеціального контролера та моделі; можливі коливання системи до встановлення рівноваги; необхідна достовірна інформація.

Джерело: розроблено авторами

Для більш наочного порівняння розглянемо сценарій зі зростаючим навантаженням на систему і виміряємо середній час відповіді сервісів при використанні різних політик. На рисинку 2 зображено залежність середнього часу відповіді від сумарного навантаження (умовно, кількості запитів за секунду) для стратегій Binpack, Spread та Game Theory (GTC, наш підхід). Криві отримано шляхом моделювання двох сервісів на двох вузлах: за малого навантаження всі стратегії дають низький час відповіді (~100 мс).

У міру зростання навантаження, Binpack починає стрімко погіршувати час відповіді (через перевантаження одного вузла), тоді як Spread і GTC зростають більш плавно. При дуже високому навантаженні (500 умовних одиниць) Binpack призводить до ~900 мс, Spread - ~350 мс, а Game Theory - ~280 мс. Таким чином, ігровий підхід наближує ефективність до оптимальної, перевершуючи обидві прості евристики.

З рисунка 2 видно, що при середніх і високих навантаженнях контролер на основі теорії ігор дозволяє підтримувати менший час відповіді, ніж Spread, уникнувши різкого росту затримки, як у випадку Binpack.

Це досягається завдяки динамічному перерозподілу: спочатку GTC може поводитися схоже на Binpack (за малого навантаження концентрувати сервіси, щоб решта ресурсів лишалася в запасі), але при наближенні до критичного завантаження він «розводить» сервіси по різних вузлах, як Spread. Водночас, якщо навантаження розподілено нерівномірно між сервісами, GTC надасть більш вимогливому сервісу більшу частку ресурсів, навіть якщо доведеться відібрати в інших, але настільки, наскільки це вигідно всім у довгостроковій перспективі (бо інакше інші теж постраждають від загального падіння продуктивності).

Оскільки система мікросервісів динамічна (навантаження змінюється постійно), Game Theory Controller повинен швидко реагувати та сходитися до нового балансу. Використання потенційної гри гарантує збіжність алгоритму найкращих відповідей, але в реальності можливі осциляції, якщо навантаження змінюється швидше, ніж встигає

спрацювати контролер. Для згладжування коливань можна впровадити інертність у прийнятті рішень (наприклад, не переміщувати сервіси занадто часто, чекати підтвердження тренду в метриках) [15].

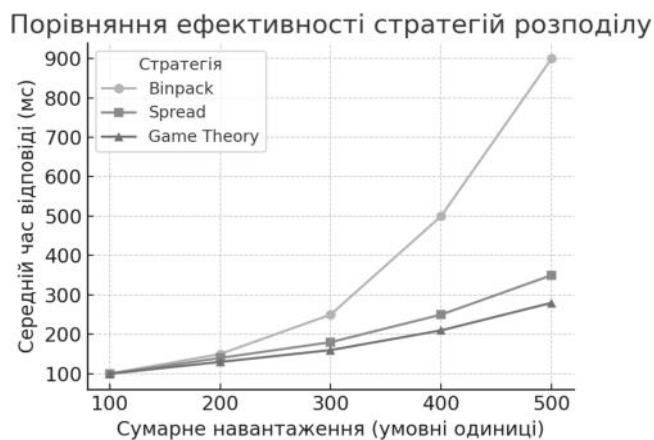


Рисунок 2 — Порівняння ефективності стратегій розподілу ресурсів (середній час відповіді залежно від навантаження)

Джерело: розроблено авторами

Обчислювальна складність контролера зростає з кількістю сервісів і вузлів. У найгіршому випадку, якщо кожен сервіс може бути на кожному з R ресурсів, простір стратегій експоненційний (R^n комбінацій). Однак на практиці n може бути обмеженим на окремому вузлі (оркестратор не розмістить надто багато подів на один вузол), і гра може розбиватися на менш розмірні під ігри (для кожного вузла окремо, або для кожного застосунку окремо, якщо в кластері кілька незалежних застосунків). Тому можливе модульне масштабування контролера, наприклад, запуск кількох екземплярів ГТС, кожен з яких оптимізує свою підмножину сервісів.

У нашій реалізації приймається, що мікросервіси «грають чесно», тобто повідомляють контролеру правдиві метрики та слідуєть виданим ним рекомендаціям. Це справедливо, оскільки всі сервіси фактично належать одному власнику (розробнику застосунку) та діють на спільну мету - якісно обслуговувати користувачів. На відміну від економічних ігор, тут немає мотиву обманювати або відхилятися від алгоритму, адже контролер прагне покращити їхні ж власні показники. Тому гру можна моделювати та розв'язувати централізовано без небезпеки маніпуляцій.

Запропонований підхід найкраще працює для сценаріїв, де взаємодія між сервісами відносно слабка, а основний фактор - конкуренція за спільні ресурси. Якщо ж мікросервіси мають сильні залежності (наприклад, послідовні виклики, що формують довгий ланцюжок), то оптимізація часу відповіді одного сервісу мало допоможе без оптимізації всього ланцюжка. В таких випадках доводиться розширювати модель, включаючи у виграш кожного сервісу і вплив затримки його сусідів. Це робить гру складнішою (функції виграшу переплітаються), але потенційний апарат все ще може бути застосований.

Висновки. У статті запропоновано підхід до оптимізації мікросервісної архітектури на основі теорії ігор. Виконано постановку проблеми розподілу обмежених ресурсів між множиною сервісів, що взаємодіють, як некооперативної гри та показано, що рівновага Неша в цій грі відповідає збалансованому розподілу ресурсів, який жоден

сервіс не зацікавлений змінювати одноосібно. На основі потенційної ігрової моделі розроблено алгоритм пошуку рівноваги та запропоновано архітектуру контролера Game Theory Controller для практичної реалізації такого підходу в системах оркестрації контейнерів.

Основні результати роботи включають:

1. Мікросервіси розглянуто як гравців, що конкурують за ресурси кластера, із формалізацією їхніх цілей через утиліти, пов'язані з показниками SLA/QoS. Показано, що проблему runtime-оптимізації можна звести до знаходження рівноваги Неша в цій грі.

2. Запропоновано ітеративний алгоритм керування ресурсами, який поступово наближається до рівноважного розподілу. Його реалізацію можна організувати як централізований контролер або у вигляді децентралізованої системи автономних агентів, вбудованих у сервіси.

3. Наведено дизайн контролера GTC, який інтегрується з існуючими засобами оркестрації (наприклад, Kubernetes) і здійснює моніторинг та переналаштування системи в автоматичному режимі. Архітектура протестована на спрощеній моделі і продемонструвала покращення продуктивності (зменшення часу відповіді, відсутність перевантажених вузлів) у порівнянні з типовими політиками.

4. Результати моделювання показують, що підхід на основі теорії ігор дозволяє знайти компроміс між полярними стратегіями, такими як Binpack і Spread. Система динамічно адаптується до поточного навантаження, уникаючи як простою ресурсів, так і їх перенавантаження, що забезпечує стабільну якість сервісів.

Водночас варто зауважити, що результати на цьому етапі дослідження є попередніми та ґрунтуються на моделюванні взаємодії лише між обмеженою кількістю сервісів. Теоретичне обґрунтування гарантій збіжності запропонованого методу, а також масштабування моделі на великі системи з великою кількістю агентів потребують подальшого вивчення.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонований метод можна застосувати в реальних хмарних платформах для автономного керування мікросервісними застосунками. Він особливо корисний для систем з непостійним, важко передбачуваним навантаженням, де статичні або прості евристичні налаштування не справляються з підтриманням SLA. Теоретико-ігровий контролер доповнює наявні механізми автоскейлінгу, додаючи їм «свідомості» про присутність інших сервісів і глобальну картину. Планується розширити модель для врахування взаємозв'язків між сервісами (гра на графі викликів) - це приведе до багаторівневих ігор або ігор з коаліціями.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що теорія ігор має значний потенціал як інструмент для оптимізації мікросервісної архітектури. Водночас, для повноцінного застосування цього підходу потрібні подальші теоретичні дослідження та практичні експерименти. У цій роботі було розглянуто модель ітеративної взаємодії між обмеженою кількістю мікросервісів для ілюстрації методу. Щоб поширити його на великі системи, необхідно провести додатковий аналіз, який заплановано у наступних етапах дослідження.

Список літератури

1. Кулагін В. П., Улічев О. С., Доренський О. П. Інноваційні рішення та переваги мікросервісної архітектури програмних продуктів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. 1. С. 16–29. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).16-29.

2. Dragoni N., et al. Microservices: How to make your application scale. *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 10742. P. 95–104. DOI: 10.1007/978-3-319-74313-4_8.
3. Altman E., et al. A survey on networking games in telecommunications. *Computers & Operations Research*. 2006. Vol. 33, № 2. P. 286–311. DOI: 10.1016/j.cor.2004.06.005.
4. Wei G., et al. A game-theoretic method of fair resource allocation for cloud computing services. *The Journal of Supercomputing*. 2010. Vol. 54, № 2. P. 252–269. DOI: 10.1007/s11227-009-0318-1.
5. Nash J. F. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1950. Vol. 36, № 1. P. 48–49. DOI: 10.1073/pnas.36.1.48.
6. Ardagna D., Panicucci B., Passacantando M. Generalized Nash equilibria for the service provisioning problem in cloud systems. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2013. Vol. 6, № 4. P. 429–442. DOI: 10.1109/TSC.2012.14.
7. Kaur K., et al. Container-as-a-Service at the Edge: Trade-off between Energy Efficiency and Service Availability at Fog Nano Data Centers. *IEEE Wireless Communications*. 2017. Vol. 24, № 3. P. 48–56. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600427.
8. Yan S., et al. An Evolutionary Game for User Access Mode Selection in Fog Radio Access Networks. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 2200–2210. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2654266.
9. Luo R., et al. Runtime Resource Management for Microservices-Based Applications: A Congestion Game Approach. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (LNICST)*. 2019. Vol. 268. P. 676–687. DOI: 10.1007/978-3-030-12981-1_47.
10. He Q., Wang H., Jin H. A Game-Theoretical Approach for User Allocation in Edge Computing Environment. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2020. Vol. 31, № 4. P. 515–529. DOI: 10.1109/TPDS.2019.2938944.
11. Kumar S., et al. A Game-Theoretic Approach for Increasing Resource Utilization in Edge Computing Enabled IoT. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 57974–57989. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3175850.
12. Na J., et al. An evolutionary game approach on IoT service selection for balancing device energy consumption. *Proc. 12th IEEE Int. Conf. on e-Business Engineering (ICEBE)*. 2015. P. 331–338. DOI: 10.1109/ICEBE.2015.64.
13. Monderer D., Shapley L. S. Potential Games. *Games and Economic Behavior*. 1996. Vol. 14, № 1. P. 124–143. DOI: 10.1006/game.1996.0044.
14. Velasquez K., et al. Service placement for latency reduction in the Internet of Things. *Annals of Telecommunications*. 2017. Vol. 72, № 1–2. P. 105–115. DOI: 10.1007/s12243-016-0524-9.
15. Baresi L., et al. A discrete-time feedback controller for containerized cloud applications. *Proc. ACM SIGSOFT Int. Symp. Foundations of Software Engineering (FSE)*. 2016. P. 217–228. DOI: 10.1145/2950290.2950328.
16. Guerrero C., Lera I., Juiz C. Resource optimization of container orchestration: a case study in multi-cloud microservices-based applications. *The Journal of Supercomputing*. 2018. Vol. 74, № 7. P. 2956–2983. DOI: 10.1007/s11227-018-2345-2.

References

1. Kulahin, V. P., Ulichev, O. S., & Dorenskyi, O. P. (2024). Innovative Solutions and Benefits of Microservice Architecture for Software Products. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 10(41, Part I)*, 16–29. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).16-29](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).16-29).
2. Dragoni, N., Lanese, I., Larsen, S. T., Mazzara, M., Mustafin, R., & Safina, L. (2018). Microservices: How to make your application scale. *Lecture Notes in Computer Science, 10742*, 95–104. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74313-4_8.
3. Altman, E., Boulogne, T., El-Azouzi, R., Jiménez, T., & Wynter, L. (2006). A survey on networking games in telecommunications. *Computers & Operations Research, 33(2)*, 286–311. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.06.005>.
4. Wei, G., Vasilakos, A. V., Zheng, Y., & Xiong, N. (2010). A game-theoretic method of fair resource allocation for cloud computing services. *The Journal of Supercomputing, 54(2)*, 252–269. <https://doi.org/10.1007/s11227-009-0318-1>.
5. Nash, J. F. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 36(1)*, 48–49. <https://doi.org/10.1073/pnas.36.1.48>.
6. Ardagna, D., Panicucci, B., & Passacantando, M. (2013). Generalized Nash equilibria for the service provisioning problem in cloud systems. *IEEE Transactions on Services Computing, 6(4)*, 429–442. <https://doi.org/10.1109/TSC.2012.14>.

7. Kaur, K., Dhand, T., Kumar, N., & Zeadally, S. (2017). Container-as-a-Service at the edge: Trade-off between energy efficiency and service availability at fog nano data centers. *IEEE Wireless Communications*, 24(3), 48–56. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600427>.
8. Yan, S., Peng, M., Abana, M. A., & Wang, W. (2017). An evolutionary game for user access mode selection in fog radio access networks. *IEEE Access*, 5, 2200–2210. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2654266>.
9. Luo, R., Ye, W., Sun, J., Liu, X., & Zhang, S. (2019). Runtime resource management for microservices-based applications: A congestion game approach. In *Proceedings of the 14th International Conference on Collaborative Computing (CollaborateCom)*, LNICST 268 (pp. 676–687). https://doi.org/10.1007/978-3-030-12981-1_47.
10. He, Q., Wang, H., Jin, H., et al. (2020). A game-theoretical approach for user allocation in edge computing environment. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 31(4), 515–529. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2019.2938944>.
11. Kumar, S., Sharma, V., You, I., et al. (2022). A game-theoretic approach for increasing resource utilization in edge computing enabled IoT. *IEEE Access*, 10, 57974–57989. doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175850.
12. Na, J., Lin, K.-J., Huang, Z., & Zhou, S. (2015). An evolutionary game approach on IoT service selection for balancing device energy consumption. In *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)* (pp. 331–338). <https://doi.org/10.1109/ICEBE.2015.64>.
13. Monderer, D., & Shapley, L. S. (1996). Potential games. *Games and Economic Behavior*, 14(1), 124–143. <https://doi.org/10.1006/game.1996.0044>.
14. Velasquez, K., Abreu, D. P., Curado, M., & Monteiro, E. (2017). Service placement for latency reduction in the Internet of Things. *Annals of Telecommunications*, 72(1–2), 105–115. <https://doi.org/10.1007/s12243-016-0524-9>.
15. Baresi, L., Guinea, S., Leva, A., & Quattrocchi, G. (2016). A discrete-time feedback controller for containerized cloud applications. In *Proceedings of the ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE)* (pp. 217–228). <https://doi.org/10.1145/2950290.2950328>.
16. Guerrero, C., Lera, I., & Juiz, C. (2018). Resource optimization of container orchestration: A case study in multi-cloud microservices-based applications. *The Journal of Supercomputing*, 74(7), 2956–2983. <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2345-2>.

Oleksandr Ulichev¹, PhD tech. sci, **Victor Kulahin**²

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Private Higher Education Establishment "European University", Kyiv, Ukraine

Game-Theoretic Approach to Microservice Optimization

Modern software systems increasingly adopt microservice architectures (MSA) to achieve modularity, scalability, and independent deployment. However, the decentralized nature of microservices introduces complex challenges in resource allocation, load balancing, and maintaining system-wide performance under dynamic workloads. Traditional orchestration methods often rely on heuristic or static rules that are insufficient for optimizing resource usage in highly variable and interactive environments.

This research explores the application of game theory as a formal framework for modeling and optimizing interactions among microservices. In this approach, each microservice is treated as a rational agent or player that independently selects strategies for resource consumption, scaling, or request routing. By applying models of non-cooperative games, such as congestion games, we identify equilibrium states (e.g., Nash equilibrium) that ensure stable and fair allocation of limited resources. In cooperative settings, game-theoretic mechanisms like Nash Bargaining can promote system-wide optimization through strategic coordination.

Simulation results demonstrate that game-theoretic strategies can significantly improve performance metrics, including average response time, resource utilization, and system resilience, compared to conventional approaches. Moreover, the integration of game-theoretic models with machine learning enables adaptive decision-making, allowing services to update strategies based on observed system states and predicted loads.

The paper shows that game theory provides a powerful and scalable foundation for the self-optimization of microservice-based systems. It opens new possibilities for designing intelligent orchestration layers capable of dynamically balancing autonomy and coordination in distributed software environments.

microservice architecture, optimization, game theory, Nash equilibrium, resource allocation, container orchestration, quality of service (QoS)

Одержано (Received) 16.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 004.8:378(477)

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.58-72](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.58-72)

І. В. Шелехов^{1,2}, доц., канд. техн. наук, **Д. В. Прилепа**², канд. техн. наук,
Ю. О. Хібовська², **К. Є. Шамонін**², **О. П. Доренський**³, доц., канд. техн. наук

¹Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

²Сумський державний університет, м. Суми, Україна

³Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: i.shelehov@snau.edu.ua, d.prylepa@cs.sumdu.edu.ua, dorenskyiop@kntu.kr.ua

Інформаційно-екстремальна технологія інтелектуального аналізу якості освітнього контенту в закладах вищої освіти

В статті подано результати дослідження, присвяченого адаптації інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології до практичної задачі інтелектуального аналізу якості освітнього контенту у закладах вищої освіти. Основна увага зосереджена на формуванні математичної моделі процесу інформаційно-екстремального машинного навчання системи класифікації якості навчальних матеріалів за оцінками роботодавців та випускників, а також на модифікації методів оптимізації функціональних параметрів машинного навчання. Таким чином, метою роботи є підвищення функціональної ефективності системи шляхом адаптації інформаційно-екстремальних моделей і методів машинного навчання до особливостей процесу оцінювання відповідності освітнього контенту вимогам ринку праці. В статті проаналізовано алгоритмічні підходи реалізації інформаційно-екстремального машинного навчання з застосуванням вкладених гіперсферичних контейнерів та критерію функціональної ефективності на основі інформаційної міри Кульбака. Запропонований підхід забезпечує зростання функціональної ефективності системи з 55% до 97%. В праці показано застосування інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології у сфері оцінювання якості та адаптації навчальних матеріалів ЗВО, що сприяє підвищенню їх відповідності актуальним вимогам, стандартам, потребам ринку праці, очікуванням роботодавців.

інтелектуальний аналіз даних, оцінювання функціональної ефективності, інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія, аналітично-інформаційна система, класифікатор

Постановка проблеми. Відповідно до сучасних Критеріїв якості вищої освіти в Україні, встановлених наказом МОН України від 15.05.2024 № 686 (Положенням про акредитацію освітніх програм, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти) актуальність змісту навчання (освітнього контенту) є невід’ємним завданням ЗВО. Водночас, ринок праці змінюється, розвиваються стандарти освіти, з’являється новий досвід випускників – навчальні матеріали повинні вчасно оновлюватися, адаптуватися до нових вимог. Проте традиційні методи оцінювання якості контенту часто базуються на суб’єктивних оцінках, не враховують комплексного аналізу і не забезпечують оперативного реагування на зміни у професійних стандартах. В результаті виникає розрив між підготовкою фахівців та потребами роботодавців, що негативно впливає на ефективність освітнього процесу та конкурентоспроможність випускників [1].

Існуючі системи керування навчанням (наприклад, дистанційним або змішаним) здебільшого не включають інтелектуальні компоненти, які могли б автоматично аналізувати та класифікувати якість навчальних матеріалів на основі реальних даних від роботодавців і випускників. Такі системи обмежені в адаптивності та гнучкості, що знижує їх здатність до актуалізації освітнього контенту в умовах динамічного розвитку ринку праці. Відсутність механізмів інтелектуального аналізу призводить до недостатнього

використання зворотного зв'язку, що ускладнює своєчасне оновлення навчальних програм [2].

Для подолання цих проблем доцільно застосовувати інформаційно-екстремальну інтелектуальну технологію (ІЕІ-технологія), яка забезпечує оптимізацію процесу навчання системи оцінювання якості контенту за допомогою геометричних моделей контейнерів класів. Ця технологія дозволяє автоматично аналізувати багатовимірні дані, підвищувати точність класифікації та адаптувати навчальні матеріали відповідно до реальних потреб ринку праці. Однак практична реалізація таких систем потребує розробки ефективних алгоритмів навчання та оптимізації параметрів, які враховують складність і неоднорідність вхідної інформації [3, 4].

Таким чином, актуальність розробки системи інтелектуального аналізу якості (СІОЯ) освітнього контенту на основі ІЕІ-технології є обґрунтованою, оскільки вона сприяє підвищенню адаптивності, точності оцінювання та загальної якості освітніх програм, що в кінцевому результаті підвищує конкурентоспроможність випускників на ринку праці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема створення інформаційних систем інтелектуального аналізу якості освітнього контенту вважається все більш актуальною в сучасній науковій літературі. У дослідженні [5] запропоновано адаптивну систему оцінювання освітніх матеріалів, яка використовує методи машинного навчання для автоматичної класифікації навчальних модулів за рівнем відповідності ринковим вимогам. У цій праці для врахування багатовимірних властивостей освітнього контенту і формування прогнозів якості матеріалу з вищою точністю застосовано багат шарові нейронні мережі. Робота [6] спрямована на формування групи навчальних модулів із подібними характеристиками, ґрунтуючись на підході до інтелектуального аналізу освітнього контенту із застосуванням кластерного аналізу та гібридних алгоритмів оптимізації. В результаті запропонована авторами методика забезпечує гнучку адаптацію освітніх програм шляхом інтеграції зворотного зв'язку від роботодавців і здобувачів вищої освіти, що підвищує релевантність навчальних курсів. У публікації [7] досліджено застосування інформаційно-екстремальних технологій для підвищення точності класифікації якості освітнього контенту. Автори розробили алгоритми оптимізації геометричних параметрів контейнерів класів якості задля підвищення функціональної ефективності системи навчання. Окрема увага приділена питанням масштабованості та адаптивності моделей у реальних інфосередовищах. В працях [8, 9] представлено аналіз інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у сфері освіти, які використовують комплексні підходи на основі нечітких логік та експертних систем. Запропоновані методи покращують процес оцінювання навчальних матеріалів, враховуючи неоднозначність та неповноту вхідних даних, що характерно для освітніх систем. Дослідження [10, 11] присвячені розробці модульної інформаційної системи з інтелектуальними компонентами для динамічного коригування змісту навчального контенту на основі аналітики оцінок користувачів і зовнішніх факторів, таких як зміни ринку праці. Особливістю підходу є інтеграція адаптивних алгоритмів навчання з можливістю масштабування системи для різних рівнів освіти. Науково-дослідні роботи [16-18] присвячені синтезу моделей інформаційних систем різного призначення задля цифрової трансформації та підвищення якості бізнес-процесів у сферах охорони здоров'я, фінансів та вищої освіти України відповідно. Запропонована адаптивна ШІ-модель для визначення інвестиційного ризику удосконалила фінансові інструменти та персоналізацію рішень; модель і технологічна реалізація ІДС «Theses» для моніторингу наукової діяльності в ЗВО сформувала основу цифрового управління академічним середовищем і прогнозування результативності його функціонування (діяльності

учасників освітнього процесу); удосконалена модель муніципальної ІС медсервісу забезпечила доступність і стійкість діджиталізованих послуг. Сукупно ці праці показали потенціал інтеграції ІІІ, ІС та цифрових технологій для підвищення ефективності управління, прозорості бізнес-процесів, доступності послуг у різних сферах людської діяльності (у освітній зокрема).

Отже, сучасні дослідження свідчать про перспективність і високу ефективність застосування інформаційно-екстремальних та гібридних інтелектуальних технологій для аналізу якості освітнього контенту.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка математичної моделі інформаційного аналізу і синтезу системи оцінювання якості освітнього контенту, що навчається у рамках ІЕІ-технології. Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі задачі: 1) компонування навчальної матриці системи інтелектуального оцінювання якості; 2) синтез математичної моделі інформаційно-екстремального машинного навчання СІОЯ; 3) оцінювання функціональної ефективності параметрів СІОЯ.

Виклад основного матеріалу. Нехай дано алфавіт класів якості освітнього контенту $\{X_m^o | m = \overline{1, M}\}$, де M – кількість класів якості, та навчальна матриця $\|y_{m,i}^{(j)} | i = \overline{1, N}, j = \overline{1, n}\|$, де N – кількість ознак оцінювання; n – кількість реалізацій в навчальній матриці [3]. Відомий вектор параметрів функціонування системи СІОЯ, має таку структуру в загальному випадку [7]:

$$g = \langle g_1, \dots, g_{\xi_1}, \dots, g_{\Xi_1}, f_1, \dots, f_{\xi_2}, \dots, f_{\Xi_2} \rangle, \Xi_1 + \Xi_2 = \Xi,$$

де $\langle g_1, \dots, g_{\xi_1}, \dots, g_{\Xi_1} \rangle$ – генотипні параметри функціонування СІОЯ, які впливають на параметри розподілу реалізацій;

$\langle f_1, \dots, f_{\xi_2}, \dots, f_{\Xi_2} \rangle$ – фенотипні параметри функціонування СІОЯ, які прямо впливають на геометрію контейнера класу якості освітнього контенту.

При цьому відомі обмеження на відповідні параметри функціонування:

$$R_{\xi_1}(g_1, \dots, g_{\xi_1}, \dots, g_{\Xi_1}) \leq 0; R_{\xi_2}(f_1, \dots, f_{\xi_2}, \dots, f_{\Xi_2}) \leq 0.$$

На етапі навчання в рамках ІЕІ-технології необхідно сформувати в радіальному базисі бінарного простору ознак оцінювання оптимальне розподілення класів якості з точки зору інформаційної ефективності, за таких умов [3, 13]:

$$\begin{aligned} & (\forall X_m^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) [X_m^o \neq \emptyset]; \\ & (\exists X_k^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) (\exists X_l^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) [X_k^o \neq X_l^o \rightarrow X_k^o \cap X_l^o \neq \emptyset]; \\ & (\forall X_k^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) (\forall X_l^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) [X_k^o \neq X_l^o \rightarrow \text{Ker} X_k^o \cap \text{Ker} X_l^o = \emptyset]; \\ & (\forall X_k^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) (\forall X_l^o \in \tilde{\mathfrak{R}}^{[M]}) [X_k^o \neq X_l^o \rightarrow (d_k^* < d(x_k \oplus x_l)) \& (d_l^* < d(x_k \oplus x_l))], \\ & \bigcup_{X_m^o \in \tilde{\mathfrak{R}}} X_m^o \subseteq \Omega_B; k \neq l; k, l, m = \overline{1, M}, \end{aligned}$$

де d_k^*, d_l^* – оптимальні радіуси гіперсферичних контейнерів класів якості $K_k^o \in X_k^o$ та $K_l^o \in X_l^o$ відповідно. Водночас інформаційний критерій функціональної ефективності (КФЕ) набуває максимуму в робочій області визначення його функції [3]:

$$E^* = \max_G E_m,$$

де E_m – КФЕ параметрів СІОЯ; G – робоча область КФЕ.

Розроблена в рамках ІЕІ-технології математична модель оптимізації геометричних параметрів вкладених контейнерів класів оцінювання якості може

розглядатися як модифікація базового оптимізаційного контуру (рис. 1), інтегрованого в алгоритм машинного навчання [13].

У представленій діаграмі відображень множин (рис. 1) використовуються такі позначення [3, 7, 13]: G – простір вхідних факторів, що характеризують ознаки освітнього контенту; T – множина моментів часу збору даних або проведення оцінювання; Z – простір можливих станів процесу адаптації та оцінювання якості контенту; Ω – простір ознак, які використовуються для класифікації модулів навчального матеріалу; Y – множина сигналів після початкової обробки вхідної інформації; $\mathfrak{R}^{[M]}$ – множина вирішальних правил; $I^{[I]}$ – множина статистичних гіпотез щодо належності реалізацій до певного класу оцінювання; $\mathfrak{Z}^{[q]}$ – множина точнісних характеристик; E – множина значень інформаційного КФЕ. Оператори відображають відповідні множини в процесі навчання і регламентують пошук оптимальних в інформаційному розумінні функціональних параметрів СЮЯ.

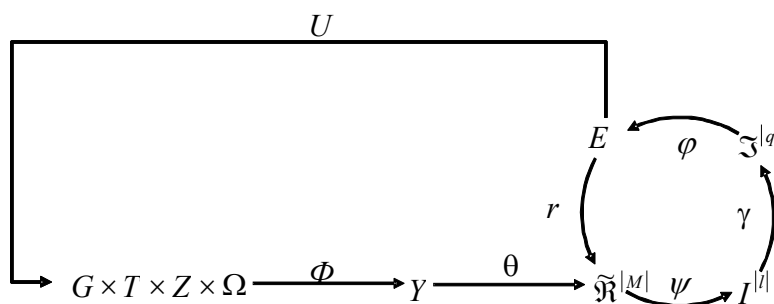


Рисунок 1 – Математична модель оптимізації геометричних параметрів вкладених контейнерів класів якості у вигляді діаграми відображень множин

Джерело: розроблено авторами

У разі, якщо структуру контейнерів класів якості контенту формують, виходячи з припущення про існування еталонного представлення навчального матеріалу, інші варіанти контенту, що мають нижчі оцінки, можуть розглядатися як варіації з певним ступенем відхилення від цього еталону. Оскільки напрям таких відхилень є невизначеним і може охоплювати будь-який аспект освітнього контенту, найбільш адекватною формою представлення класів у такому випадку є вкладена структура. У центрі такої структури розташовується зразок, що відповідає найвищому рівню якості; навколо нього — приклади рівня «добре»; ще далі – реалізації з оцінкою «задовільно». Для реалізації такої схеми контейнерів у просторі ознак оцінювання якості доцільно модифікувати традиційне представлення гіперсферичних контейнерів, передбачивши можливість формування вкладеної гіперсферичної області, тобто дозволивши створювати в середині контейнера порожнину гіперсферичної форми. У цьому разі кожен контейнер задається трьома параметрами: координатами центру x_k , внутрішнім $R_1^{(k)}$ і зовнішнім $R_2^{(k)}$ радіусами гіперсфери. Крім того, для задачі оцінювання якості контенту з використанням прийнятої раніше гіпотези необхідно ввести додаткове обмеження відносно центрів контейнерів класів оцінювання якості.

$$x_1 = x_2 = x_3 = \underbrace{(11\dots1)}_N = x \quad (1)$$

де N – потужність простору ознак оцінювання якості.

Удосконалена модель, що представлена у вигляді схематичної діаграми відображень множин, що ілюструє структуру оптимізаційного процесу (рис. 2).

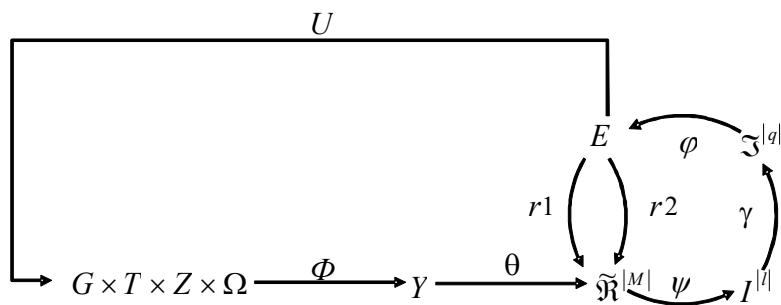


Рисунок 2 – Математична модель оптимізації геометричних параметрів вкладених контейнерів класів якості у вигляді діаграми відображень множин

Джерело: розроблено авторами

В якості КФЕ інтелектуальної СІОЯ освітнього контенту застосовується інформаційна міра Кульбака [3, 14, 15], яка для рівноймовірних двохальтернативних рішень визначається формулою:

$$E_m = 0,5 \log_2 \left(\frac{D_1 + D_2 + 10^{-r}}{\alpha + \beta + 10^{-r}} \right) * \left[(D_1 + D_2) - (\alpha + \beta) \right], \quad (2)$$

де D_1 , D_2 – перша та друга достовірності, обчислені на k -му кроці навчання; α , β – помилка першого та другого роду; 10^{-r} – достатньо мале число для уникнення поділу на 0. Застосування інформаційної міри Кульбака дозволяє інтегрувати в єдиний критерій такі різні, але взаємозалежні показники, як точність та ймовірність хибних спрацювань.

Отже, запропонована модифікація полягає у введенні контурів оптимізації внутрішнього $\Psi \rightarrow \gamma \rightarrow \Phi \rightarrow r_1$ та зовнішнього $\Psi \rightarrow \gamma \rightarrow \Phi \rightarrow r_2$ радіусів вкладених контейнерів класів якості, що дозволяє безпосередньо оптимізувати геометричні параметри розбиття класів $\tilde{\mathcal{R}}^{|M|}$, замість застосування одного контуру $\Psi \rightarrow \gamma \rightarrow \Phi \rightarrow r$ (рис. 1). Послідовність оптимізації радіусів контейнера для кожного класу якості може бути вибрана довільно. Відповідно до принципів ІЕІ-технології оптимальними вважаються такі значення радіусів, які відповідають максимальному значенню КФЕ в робочій області $d_k^* = \arg \max_{G_{d_k}} E_k(d_k)$ або

$$(d_{I,k}^*, d_{O,k}^*) = \arg \max_{G_{d_{I,k}} \times G_{d_{O,k}}} E_k(d_{I,k}, d_{O,k}) \text{ для модифікованої варіації моделі.}$$

Використання вкладених контейнерів класів якості вимагає внесення коректив в базовий алгоритм навчання СІОЯ в рамках ІЕІТ. Розглянемо основні етапи реалізації цього алгоритму за математичною моделлю представленої на рис. 2 [13, 14]:

1) Бінеаризація навчальної матриці $\|y_{m,i}^{(j)}\|$ з використанням системи контрольних допусків (СКД) на ознаки оцінювання $\delta_{K,i}$:

$$x_{m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \in \delta_{K,i}; \\ 0, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \notin \delta_{K,i}. \end{cases}$$

2) Формування центру вкладених гіперсферичних контейнерів класів якості x (1).

3) Ініціалізація циклу оптимізації геометричних параметрів вкладеного гіперсферичного контейнеру класу якості $k = 0, 1, \dots, m$.

- 4) Ініціалізація циклу оптимізації зовнішнього радіуса $d_{O,k} = 0, 1, \dots, N$.
- 5) Ініціалізація циклу оптимізації внутрішнього радіуса $d_{I,k} = 0, 1, \dots, d_{O,k}$.
- 6) Відтворення вкладеного гіперсферичного контейнеру k -го класу якості з центром x і поточними зовнішнім і внутрішнім радіусами, оцінювання його точностних характеристик ($D_1(d_{I,k}, d_{O,k}), D_2(d_{I,k}, d_{O,k})$) та обчислення КФЕ $E_k(d_{I,k}, d_{O,k})$ (2).
- 7) Завершення циклу оптимізації внутрішнього радіуса $d_{I,k}$.
- 8) Завершення циклу оптимізації зовнішнього радіуса $d_{O,k}$.
- 9) Визначення оптимальних радіусів $\langle d_{I,k}^*, d_{O,k}^* \rangle = \arg \max_{G_{d_{I,k}} \times G_{d_{O,k}}} E_k(d_{I,k}, d_{O,k})$, де $\{G_{d_{I,k}} \times G_{d_{O,k}}\}$ – робоча область визначення КФЕ ($D_1(d_{I,k}, d_{O,k}) > 0.5$ та $D_2(d_{I,k}, d_{O,k}) > 0.5$)
- 10)) Завершення циклу оптимізації геометричних параметрів вкладених гіперсферичних контейнерів класів якості k

В рамках ІЕІ-технології запропоновані два алгоритми оптимізації СКД [3, 4]: паралельний, що оптимізує ширину поля допусків δ_K для всіх ознак оцінювання якості одночасно, та послідовний, що визначає оптимальну ширину поля кожної ознаки окремо $\{\delta_{K,i}^*\}$. При цьому оптимальними вважаються такі значення СКД, що відповідають максимальному усередненому значенню КФЕ в робочій області його визначення $\delta_K^* = \arg \left\{ \max_{G_{\delta_K}} \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \max_{G_{d_k}} E_k(d_k) \right] \right\}$ або $\delta_K^* = \arg \left\{ \max_{G_{\delta_K}} \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \max_{G_{d_{I,k}} \times G_{d_{O,k}}} E_k(d_{I,k}, d_{O,k}) \right] \right\}$ для модифікованої моделі. Аналогічні модифікації використовуються в алгоритмах послідовної оптимізації СКД, що перетворює стандартну процедуру $\{\delta_{K,i}^*\} = \arg \left\{ \max_{G_{\delta_{K,i}}} \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \max_{G_{d_k}} E_k(d_k) \right] \right\}, i = \overline{1, N}$ пошуку оптимальної СКД для i – тої ознаки на $\{\delta_{K,i}^*\} = \arg \left\{ \max_{G_{\delta_{K,i}}} \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \max_{G_{d_{I,k}} \times G_{d_{O,k}}} E_k(d_{I,k}, d_{O,k}) \right] \right\}, i = \overline{1, N}$, зберігаючи порядок вкладеності контурів оптимізації.

Для оцінювання ефективності СІОЯ освітнього контенту на основі ІЕІ-технології було сформовано навчальну матрицю, що містить три класи якості освітнього контенту. Перший клас X_0^o відповідає контенту відмінної якості, другий клас X_1^o – матеріалам із оцінкою «добре», третій X_2^o – з оцінкою «задовільно». Вхідні дані формувалися на основі результатів оцінювання якості навчального контенту кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету. Інформація, необхідна для навчання системи, вносилася до бази даних співробітниками кафедри. Робочі масиви даних формувалися шляхом опитування роботодавців, випускників і студентів університету, які надають оцінки навчальним модулям за шкалою від 0 до 100 балів. Для комплексного оцінювання якості використовувався набір із 50 характеристик (рис. 3), за якими респонденти мали визначити рівень якості навчального контенту під час проведення опитувань випускників та представників роботодавців. А саме:

- зміст навчального контенту – відповідність освітній програмі, сучасність інформації, відповідність рівню освіти, врахування потреб ринку праці, комплексність охоплення тем, міждисциплінарність, чіткість структури матеріалів, відповідність стандартам, академічна доброчесність, джерела та бібліографія;
- методична якість: логічна послідовність подання, чіткість формулювань, використання прикладів і кейсів, актуальні задачі / вправи, доступність викладу, різноманітність методів, відповідність результатам навчання, стимулювання

критичного мислення і креативності, засоби активного навчання, рекомендації до самостійної роботи;

- технічна якість: форматування та дизайн, адаптивність до пристроїв, зручність навігації, відсутність технічних помилок, оптимізація для онлайн, мультимедійні матеріали, якість зображень і відео, сумісність з платформами, можливість друку, захист авторських прав;

- оцінювання та фідбек: чіткість критеріїв оцінювання, різнорівневі завдання, автоматизовані тести, наявність зразків відповідей, систематичний зворотний зв'язок, відстеження прогресу, оцінювання знань і компетентностей, формувальне оцінювання, рефлексивні завдання, узгодженість контрольних точок;

- педагогічна цінність: мотиваційність змісту, відповідність різним стилям, підтримка самостійного мислення, сприяння креативності, інклюзивність, підтримка міжкультурного діалогу, можливість індивідуалізації, етичний нейтралітет, врахування зворотного зв'язку, гнучкість в оновленні матеріалу.

Таким чином, джерелом даних для всіх графіків та числових показників є реальна, емпірично зібрана інформація.

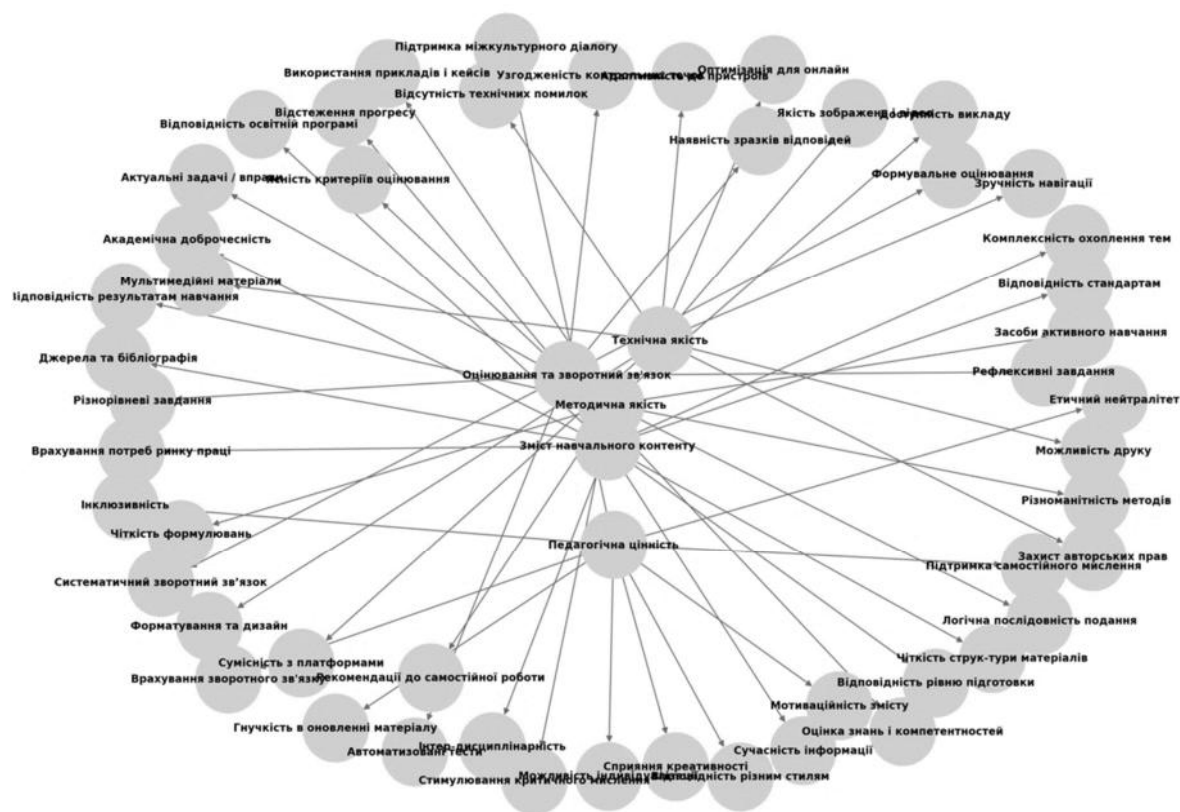


Рисунок 3 – Ієрархічна схема характеристик якості освітнього контенту ЗВО

Джерело: розроблено авторами

На початковому етапі побудови вирішальних правил інтелектуальної системи застосовано паралельний алгоритм оптимізації СКД для СЮЯ, що ілюструється на рисунку 2. Результати оптимізації СКД за допомогою даного алгоритму показано на рисунку 3. При цьому робоча область визначення усередненого КФЕ (УКФЕ) відзначена штриховкою. Аналіз отриманих даних свідчить, що оптимальним з інформаційної точки зору параметром є $\delta^* = 11$, при якому досягається максимальне УКФЕ, що становить $\bar{E}^* = 1.04$.

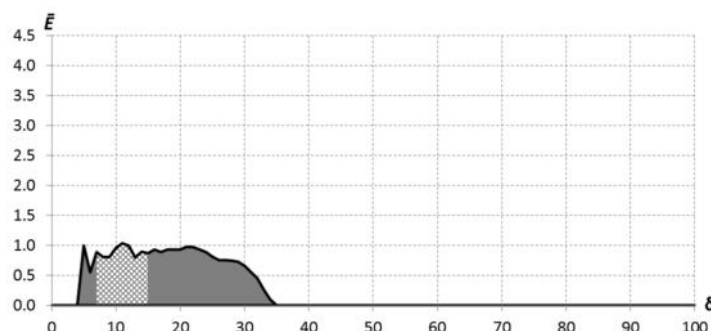
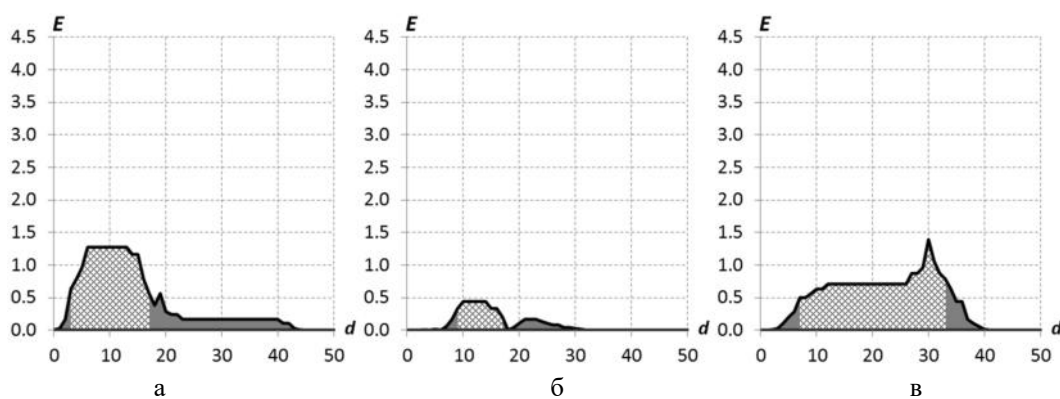


Рисунок 4 – Графік зміни УКФЕ при паралельній оптимізації СКД

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 5 наведено детальний процес оптимізації радіусів гіперсферичних контейнерів, які відповідають окремим класам якості освітнього контенту.

Рисунок 5 – Графік зміни КФЕ при оптимізації геометричних параметрів вирішальних правил: а – класу X_0^o ; б – класу X_1^o ; в – класу X_2^o

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів оптимізації показав, що для досягнення найкращих результатів у кожному з класів контейнерів, параметри повинні мати наступні значення: для класу X_0^o оптимальний радіус становить $d_0=6$ при міжцентровій відстані $d_c=21$, для класу X_1^o – $d_1=10$ при $d_c=21$, а для класу X_2^o – $d_2=30$ при $d_c=32$. При цих параметрах контейнерів отримані такі значення КФЕ та точносних характеристик системи керування: для класу X_0^o $E=1.27358$ ($D_1=0.85$; $\beta = 0.20$), для класу X_1^o $E=0.44$ ($D_1 = 0.55$; $\beta = 0.15$), для класу X_2^o $E = 1.39$ ($D_1 = 0.93$; $\beta = 0.25$).

Для підвищення ефективності навчання застосовано послідовний алгоритм оптимізації СКД на ознаки оцінювання. На рисунку 6 зображено динаміку зміни УКФЕ в процесі оптимізації СКД.

Оптимальне значення параметра СКД було досягнуто на третьому етапі оптимізації після 200-ї ітерації. При цьому максимальне значення УКФЕ склало 1.40. Результати оптимізації геометричних параметрів вирішальних правил для трьох класів якості за такого СКД наведені на рисунку 7.

Аналіз результатів оптимізації показує, що оптимальні параметрами контейнерів для класів якості визначаються такими значеннями: для першого класу X_0^o E радіус $d_0=9$ при міжцентровій відстані $d_c=13$, для другого класу X_1^o – радіус $d_1=10$ при

міжцентровій відстані $d_c=13$, для третього класу X_2^o – радіус $d_2=13$ при міжцентровій відстані $d_c=14$. Відповідно до цих параметрів, значення КФЕ та точносних характеристик системи керування для кожного класу такі: для першого класу X_0^o $E=1.39$ ($D_1=0.80$; $\beta=0.13$), для другого класу X_1^o $E=1.16$ ($D_1=0.72$; $\beta=0.10$), для третього класу X_2^o $E=1.66$ ($D_1=0.97$; $\beta=0.25$).

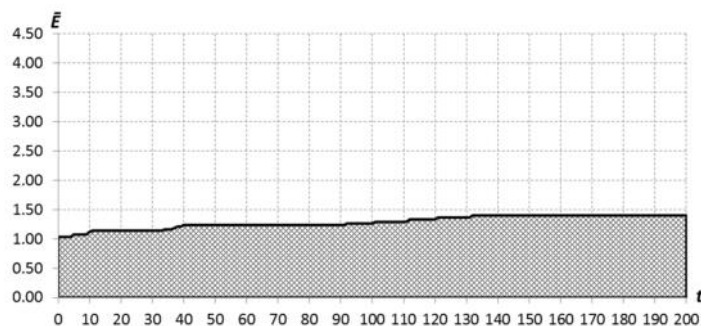
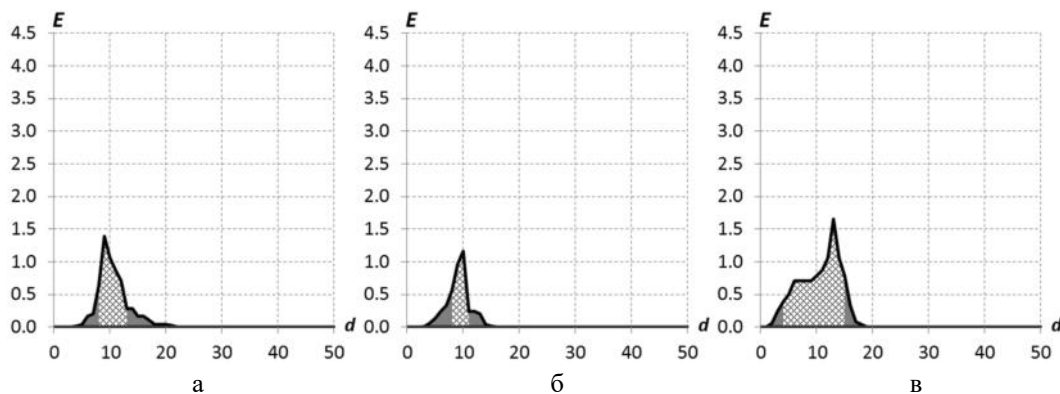


Рисунок 6 – Графік зміни усередненого КФЕ в процесі оптимізації СКД за послідовної алгоритмом

Джерело: розроблено авторами



1. Рисунок 7 – Графік зміни КФЕ при оптимізації геометричних параметрів вирішальних правил:

2. а – класу X_0^o ; б – класу X_1^o ; в – класу X_2^o

3. Джерело: розроблено авторами

Для підвищення точності вирішальних правил були застосовані вкладені контейнери з єдиним центром. Відповідно до алгоритму, всі координати еталонних векторів для класів якості були рівні одиниці. Результати оптимізації СКД для такої структури контейнерів за допомогою паралельного алгоритму показано на рисунку 8.

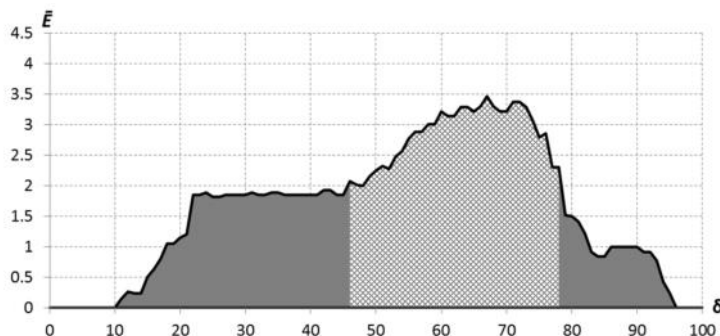


Рисунок 8 – Графік зміни УКФЕ при паралельній оптимізації СКД

Джерело: розроблено авторами

При оптимальному значенні параметра СКД $\delta^* = \pm 67$, яке забезпечує максимальне значення УКФЕ $\bar{E}_{\max} = 3.47$ у робочій області цього параметра, була проведена оптимізація геометричних параметрів контейнерів класів якості, що показано на рисунку 9.

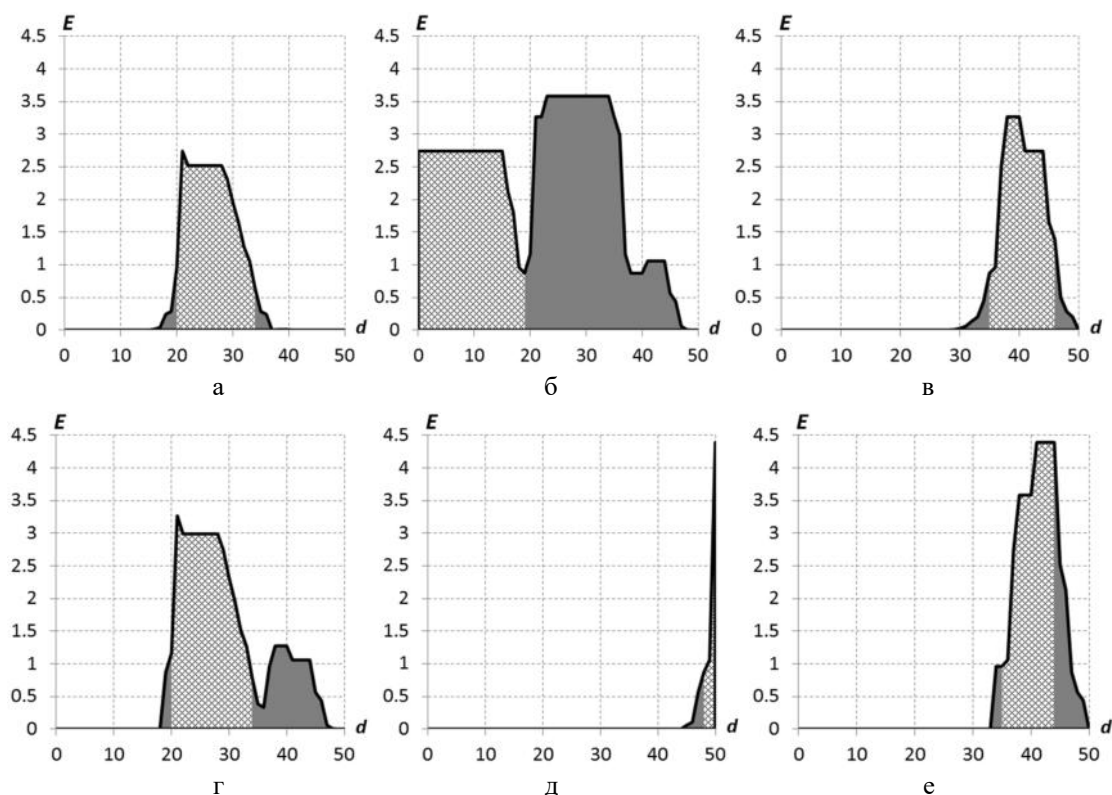


Рисунок 9 – Графік зміни КФЕ при оптимізації геометричних параметрів вирішальних правил:

а – зовнішній радіус $R_1^{(0)}$ класу X_0^o ; б – внутрішній радіус $R_2^{(0)}$ класу X_0^o ;

в – зовнішній радіус $R_1^{(1)}$ класу X_1^o ; г – внутрішній радіус $R_2^{(1)}$ класу X_1^o ;

д – зовнішній радіус $R_1^{(2)}$ класу X_2^o ; е – внутрішній радіус $R_2^{(2)}$ класу X_2^o

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів оптимізації показав, що оптимальними параметрами контейнерів для класів якості є: для першого класу X_0^o – зовнішній радіус $R_2^{(k)} = 21$, внутрішній радіус $R_1^{(k)} = 0$; для другого класу X_1^o – зовнішній радіус $R_2^{(k)} = 38$, внутрішній радіус $R_1^{(k)} = 21$; для третього класу X_2^o – зовнішній радіус $R_2^{(k)} = 50$, внутрішній радіус $R_1^{(k)} = 41$. За цими параметрами, значення КФЕ та точносних характеристик системи керування для кожного класу становлять: для першого класу X_0^o – $E_{\max}^{(0)} = 2.74$ ($D_1 = 0.93$; $\beta = 0.05$), для другого X_1^o – $E_{\max}^{(1)} = 3.27$ ($D_1 = 0.95$; $\beta = 0.03$), для третього X_2^o – $E_{\max}^{(2)} = 4.39$ ($D_1 = 1$; $\beta = 0$).

Для покращення ефективності навчання було застосовано послідовний алгоритм оптимізації СКД для ознак оцінювання. Динаміка зміни УКФЕ в процесі оптимізації СКД відображена на рисунку 10.

Аналіз результатів показав, що оптимальне значення параметра СКД досягнуто на третьому етапі оптимізації після 150-ї ітерації. При цьому максимальне значення

УКФЕ склало 3.98. Результати оптимізації геометричних параметрів вирішальних правил для трьох класів якості при такому СКД представлені на рисунку 11.

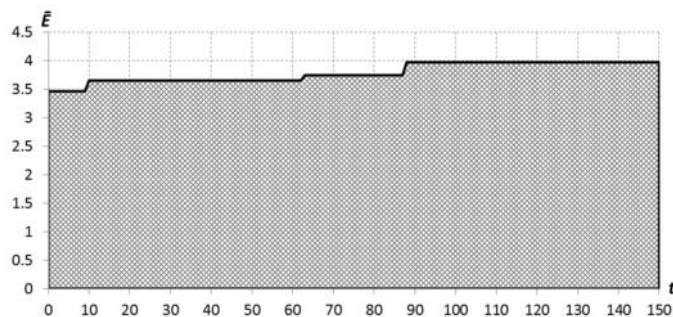


Рисунок 10 – Графік зміни УКФЕ в процесі оптимізації СКД за послідовної алгоритмом
Джерело: розроблено авторами

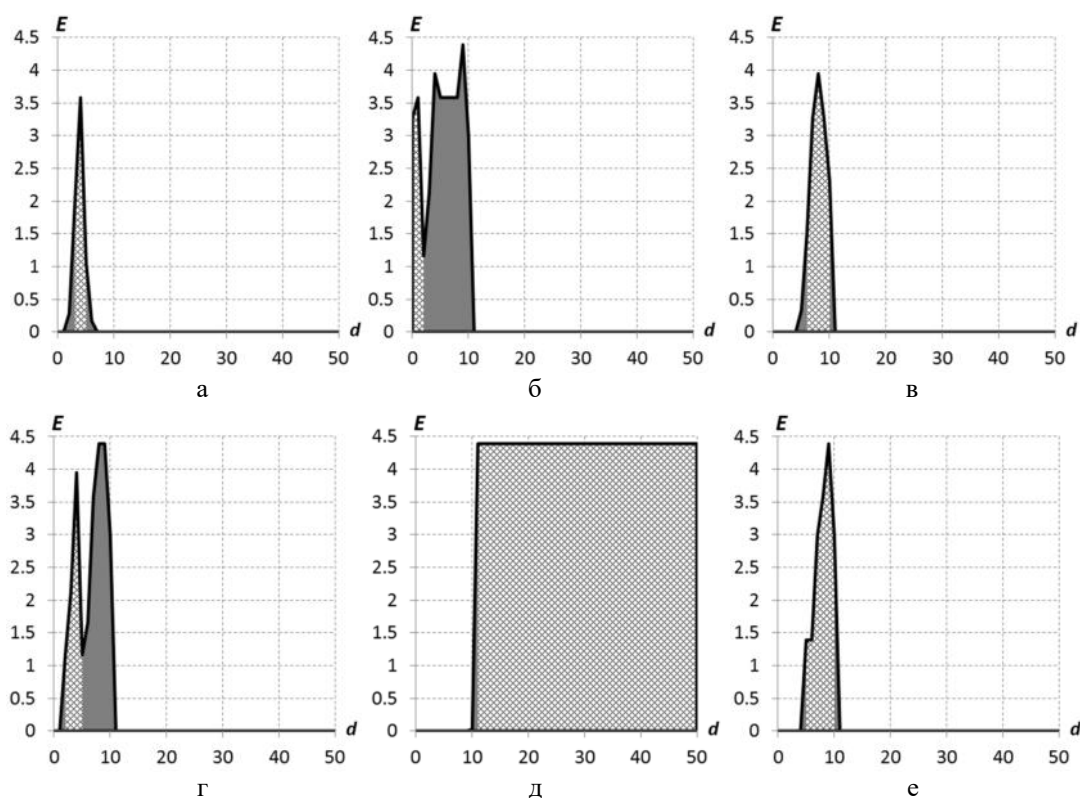


Рисунок 11 – Графік зміни КФЕ при оптимізації геометричних параметрів вирішальних правил:

- а – зовнішній радіус $R_1^{(0)}$ класу X_0^o ; б – внутрішній радіус $R_2^{(0)}$ класу X_0^o ;
в – зовнішній радіус $R_1^{(1)}$ класу X_1^o ; г – внутрішній радіус $R_2^{(1)}$ класу X_1^o ;
д – зовнішній радіус $R_1^{(2)}$ класу X_2^o ; е – внутрішній радіус $R_2^{(2)}$ класу X_2^o

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів оптимізації показує, що для контейнерів класів якості оптимальними параметрами є: для першого класу X_0^o – зовнішній радіус $R_2^{(k)}=4$, внутрішній радіус $R_1^{(k)}=1$; для другого класу X_1^o – зовнішній радіус $R_2^{(k)}=8$, внутрішній радіус $R_1^{(k)}=4$; для третього класу X_2^o – зовнішній радіус $R_2^{(k)}=11$, внутрішній радіус $R_1^{(k)}=9$. Згідно з цими параметрами контейнерів, значення КФЕ та точностних

характеристик системи управління для кожного класу становлять: для першого класу $X_0^o - E_{\max}^{(0)} = 3.58$ ($D_1 = 0.95$; $\beta = 0$), для другого $X_1^o - E_{\max}^{(1)} = 3.95$ ($D_1 = 0.97$; $\beta = 0$), для третього $X_2^o - E_{\max}^{(2)} = 4.39$ ($D_1 = 1$; $\beta = 0$).

Отже, розроблено математичну модель та алгоритми для інтелектуальної аналітично-інформаційної системи оцінювання якості освітнього контенту з використанням ІЕІ-технології. Це дозволило підвищити точність класифікації навчальних модулів. Програмно реалізовані алгоритми інформаційно-екстремального машинного навчання СІОЯ з орієнтацією на оптимізацію основних функціональних параметрів, їх QC на практичному прикладі задачі машинного навчання класифікаційному оцінюванню трьох класів якості навчального контенту на основі результатів опитування зовнішніх стейкхолдерів (випускників та роботодавців) [12] забезпечили зростання функціональної ефективності системи з 55% (отриманого при застосуванні менш ефективного алгоритму оптимізації) до 97% (досягнутого за допомогою послідовного алгоритму оптимізації з вкладеними контейнерами). Таким чином досягнуто підвищення функціональної ефективності системи, а також підтверджено доцільність застосування обраного підходу для адаптації освітніх програм до вимог ринку праці.

Обговорення одержаних результатів. Запропоноване технологічне рішення – ІЕС – порівняно з існуючими аналогами вирізняється високою теоретичною обґрунтованістю, фокусом на оптимальність рішень. До ключової переваги автори відносять максимізацію точності класифікації, що досягнуто побудовою моделей, які дають максимально можливу правильність рішень для заданих даних. В контексті оцінювання якості освітнього матеріалу означене забезпечує мінімум хибних рішень (висновків) щодо його належності (відповідності або невідповідності) встановленим вимогам та очікуванням. До сильних сторін також слід віднести отриману інваріантність до розмірності і складності даних: оскільки задача має багатовимірний простір ознак, порівняно з існуючими алгоритмами інформаційно-екстремальна технологія дозволяє забезпечити надійність рішень завдяки геометричному підходу: гіперсфери у просторі ознак. Практична цінність ІЕС – вона є гнучкою технологією, яка дозволяє забезпечити періодичний моніторинг навчального контенту відповідно до змін у зовнішньому середовищі (вимоги ліцензійних умов, стандартів вищої освіти, запити працедавців, рекомендації випускників тощо).

Недоліки та слабкі сторони ІЕС формують: складність реалізації (математичний апарат ІЕТ досить складний, тому для впровадження вимагає кваліфікованих фахівців з аналізу даних), вимога до навчальної вибірки та експертних даних (метод потребує наявності репрезентативної матриці ознак і рішень для навчання, тобто необхідним є експертне оцінювання великої кількості освітніх компонент ОП для навчання ІЕТ-системи), а головне – ІЕТ зосереджена на класифікаційних задачах з фіксованими класами «відповідає вимогам» або «не відповідає» вимогам, не даючи відповіді чому саме контент не відповідає.

Висновки. У роботі представлено математичну модель та алгоритми для інформаційної системи інтелектуального аналізу якості освітнього контенту випускової кафедри, що базується на технології ІЕІ. Запропонований підхід включає формування навчальної матриці на основі оцінок випускників та роботодавців, математичне моделювання процесу навчання системи оцінювання та оптимізацію основних функціональних параметрів СІОЯ, в тому числі, вкладених гіперсферичних контейнерів

класів оцінювання та системи контрольних допусків на ознаки оцінювання.

Експериментальні дослідження виконані на трьох класах якості освітнього контенту [12]. Використання інформаційної міри Кульбака як критерію функціональної ефективності дозволило оптимізувати параметри системи керування та, як наслідок, досягти підвищення точності класифікації, зокрема, до 97%. Застосування паралельних і послідовних алгоритмів оптимізації системи контрольних допусків сприяло покращенню адаптивності системи та зменшенню помилкових спрацьовувань. Водночас виявлено, що система є недосконалою щодо роботи з більш складними класами освітнього контенту, а також потребує удосконалення в частині забезпечення гнучкості у випадку розширення функціональних можливостей ІЕТ-системи.

Перспективним напрямом подальших розвідок є дослідження можливості інтегрування додаткових інтелектуальних методів на кшталт гібридних нейро-нечітких моделей. Крім того, окремої уваги слід приділити пошуку інтегрованих рішень, які б поєднали сильні сторони ІЕТ з гнучкістю нечіткої логіки, потужністю сучасного ШІ. Це – перспективний шлях до комплексних (інтегрованих) СІОЯ.

Запропонована ІЕС може бути впроваджена в заклади вищої освіти України для цифровізованого моніторингу й оцінювання якості освітнього контенту ЗВО, що забезпечить підвищення відповідності змісту освіти за освітніми програмами актуальним вимогам, підвищення якості освіти та конкурентоспроможності випускників українських університетів на ринку праці.

Список літератури

1. Meylani R. A Comparative Analysis of Traditional and Modern Approaches to Assessment and Evaluation in Education. *Journal of Educational Research*. 2024. Vol. 15, № 1. P. 520–555. DOI: 10.51460/baebd.1386737.
2. Kintanar F., Elladora S. T., Genabe V. C., Rendon Z. L. L. Perceived Limitations of E-learning Platforms. *International Journal of Educational Research*. 2021. Vol. 11, № 2. P. 157–172.
3. Довбиш А. С. Основи проєктування інтелектуальних систем : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2009. 172 с.
4. Прилепа Д. В. Інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія діагностування емоційно-психічного стану людини : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Харків, 2024. 188 с.
5. Ezzahraa Elhabti F. Enhancing student performance prediction in e-learning ecosystems using machine learning techniques. *International Journal of Information and Education Technology*. 2025. Vol. 15, № 2. P. 301–311. DOI: 10.18178/ijiet.2025.15.2.2243.
6. Sayed B. T., Madanan M., Biju N. Intelligent systems to measure the quality of assessments in higher education. *Journal of Management Information and Decision Sciences*. 2022. Vol. 25(S6). P. 1–11.
7. Довбиш А. С., Шелехов І. В., Хібовська Ю. О., Матяш О. В. Інформаційно-аналітична система оцінювання відповідності сучасним вимогам навчального контенту спеціальності кібербезпека. *Радіоелектроніка і комп'ютерні системи*. 2021. Т. 1, № 197. С. 70. DOI: 10.32620/reks.2021.1.06.
8. Zhang Y., Li X. Student achievement prediction and auxiliary improvement method based on fuzzy decision support system. *Discover Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 5, № 63. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00308-7>.
9. Senkivskyi V., Sikora L., Lysa N., Kudriashova A., Pikh I. Fuzzy system for the quality assessment of educational multimedia edition design. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 8. Article 4415. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15084415>.
10. Sajja R., Sermet Y., Cikmaz M., Cwierty D., Demir I. Artificial Intelligence-Enabled Intelligent Assistant for Personalized and Adaptive Learning in Higher Education. *Information*. 2024. Vol. 15(10). Article 596. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15100596>.
11. Tavakoli M., Mol S. T., Kismihók G. Labour market information driven, personalized, OER recommendation system for lifelong learners. *arXiv preprint*. 2020. P. 96–104. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.07465>.
12. Гладченко М. С. Інформаційна система інтелектуального аналізу якості освітнього контенту кафедри : роб. на здоб. кваліф. ступ. магістр ; спец. 122 – комп'ютерні науки (інформатика)

- [Електрон. ресурс] / М. С. Гладченко ; наук. кер. І. В. Шелехов. Суми : СумДУ, 2019. 59 с. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76815>.
13. Shelekhov I. V., Prylepa D. V., Khibovska Y. O., Otroshchenko M. S. Machine learning decision support systems for adaptation of educational content to the labor market requirements. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2023. Vol. 1, № 62. P. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-1-6>.
 14. Шелехов І. В., Прилепа Д. В., Зборщик О. П., Міщенко А. Є. Побудова вирішальних правил для СППР адаптації навчального контенту випускної кафедри до вимог ринку праці. *Patent RF*. № 6551. 2022.
 15. Moskalenko V. V., Moskalenko A. S., Korobov A. G. Models and methods of intellectual information technology of autonomous navigation for compact drones. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. № 3. P. 68–77. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-8.
 16. Dorenskyi O., Drobko O., Drieiev O. Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. 2. С. 3–10. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10.
 17. Korniiienko O., Kozub N., Dorenskyi O. Method and Technological Solution of an AI-Based Adaptive Investor Survey Service for Determining an Individual Risk Profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 11(42), Part II. P. 3–10. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.3-10.
 18. Kachurivskyi V., Kotovskyi A., Lykhodid T., Kachurivska H., Dorenskyi O. The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 27–36. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36.

References

1. Meylani, R. (2024). A comparative analysis of traditional and modern approaches to assessment and evaluation in education. *Journal of Educational Research*, 15(1), 520–555. <https://doi.org/10.51460/baebd.1386737>.
2. Kintanar, F., Elladora, S. T., Genabe, V. C., & Rendon, Z. L. L. (2021). Perceived limitations of e-learning platforms. *International Journal of Educational Research*, 11(2), 157–172.
3. Dovbysh, A. S. (2009). *Osnovy proektuvannia intelektualnykh system* [Fundamentals of intelligent systems design]. Sumy: SumDU. [in Ukrainian].
4. Prylepa, D. V. (2024). *Informatsiino-ekstremalna intelektualna tekhnolohiia diagnostuvannia emotsiino-psykhichnoho stanu liudyny* [Information-extreme intellectual technology for diagnosing the emotional and mental state of a person] (Doctoral dissertation). Kharkiv [in Ukrainian].
5. Ezzahraa Elhabti, F. (2025). Enhancing student performance prediction in e-learning ecosystems using machine learning techniques. *International Journal of Information and Education Technology*, 15(2), 301–311. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2025.15.2.2243>.
6. Sayed, B. T., Madanan, M., & Biju, N. (2022). Intelligent systems to measure the quality of assessments in higher education. *Journal of Management Information and Decision Sciences*, 25(S6), 1–11.
7. Dovbysh, A. S., Shelekhov, I. V., Khibovska, Y. O., & Matiash, O. V. (2021). Informatsiino-analitychna systema otsiniuvannia vidpovidnosti suchasnym vymoham navchalnoho kontentu spetsialnosti kibernetika [Information-analytical system for assessing compliance of cybersecurity educational content with modern requirements]. *Radioelektronika i kompiuterni systemy*, 1(197), 70. <https://doi.org/10.32620/reks.2021.1.06> [in Ukrainian].
8. Zhang, Y., & Li, X. (2025). Student achievement prediction and auxiliary improvement method based on fuzzy decision support system. *Discover Artificial Intelligence*, 5(63), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00308-7>.
9. Senkivskyy, V., Sikora, L., Lysa, N., Kudriashova, A., & Pikh, I. (2025). Fuzzy system for the quality assessment of educational multimedia edition design. *Applied Sciences*, 15(8), 4415. <https://doi.org/10.3390/app15084415>.
10. Sajja, R., Sermet, Y., Cikmaz, M., Cwiertyny, D., & Demir, I. (2024). Artificial intelligence-enabled intelligent assistant for personalized and adaptive learning in higher education. *Information*, 15(10), 596. <https://doi.org/10.3390/info15100596>.
11. Tavakoli, M., Mol, S. T., & Kismihók, G. (2020). Labour market information driven, personalized, OER recommendation system for lifelong learners. *arXiv preprint*, 96–104. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.07465>.
12. Hladchenko, M. S. (2019). *Informatsiina systema intelektualnoho analizu yakosti osvithnoho kontentu kafedry* [Information system for intelligent analysis of the quality of educational content of the department]

- (Master's thesis, SumDU). Sumy: SumDU. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76815> (Accessed: 06.06.2025). [in Ukrainian].
13. Shelehov, I. V., Prylepa, D. V., Khibovska, Y. O., & Otroshchenko, M. S. (2023). Machine learning decision support systems for adaptation of educational content to the labor market requirements. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1(62), 62–72. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-1-6>.
 14. Shelehov, I. V., Prylepa, D. V., Zborshchuk, O. P., & Mishchenko, A. Ye. (2022). Pobudova vyrishalnykh pravyl dlia SPPR adaptatsii navchalnoho kontentu vypusknnoi kafedry do vymoh rynku pratsi [Construction of decision rules for DSS adaptation of graduation department's educational content to labor market requirements]. Patent RF No. 6551. [in Ukrainian].
 15. Moskalenko, V. V., Moskalenko, A. S., & Korobov, A. G. (2018). Models and methods of intellectual information technology of autonomous navigation for compact drones. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 3, 68–77. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-8>.
 16. Dorenskyi, O., Drobko, O., & Drieiev, O. (2022). Improved model and software of the digital information service of the municipal health care institutions. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5(36, Part II), 3–10. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10).
 17. Korniienko, O., Kozub, N., & Dorenskyi, O. (2025). Method and technological solution of an AI-based adaptive investor survey service for determining an individual risk profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, Part II), 3–10. [doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.3-10).
 18. Kachurivskiy, V., Kotovskiy, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., & Dorenskyi, O. (2025). The concept of digital transformation of monitoring scientific activity of participants in educational process of the Ukrainian HEI. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, Part I), 27–36. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36).

Igor Shelehov^{1,2}, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Dmytro Prylepa², PhD tech. sci., Yuliia Khibovska², Kiril Shamonin², Oleksandr Dorenskyi³, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

²Sumy State University, Sumy, Ukraine

³Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Information-Extreme Technology of Intelligent Analysis of Educational Content Quality in Higher Education Institutions

The article is dedicated to the development of an informational analytical-intellectual system for assessing the quality of educational content produced by the graduating department, using information-extreme intellectual technology. The research focuses on improving the accuracy of classifying educational materials according to the evaluations of graduates and employers, considering the dynamics of the labor market. The main attention is on developing a mathematical model of the machine learning process for a system that classifies the quality of educational materials based on the assessments of employers and graduates.

A mathematical model for the operation of the analytical intellectual analysis system has been developed, based on the concept of nested hyperspherical containers of quality classes. Algorithms for parallel and sequential optimization of assessment feature tolerance limits have been developed, allowing the improvement of the system's functional efficiency under conditions of limited input data. The optimal geometric parameters of containers for each quality class have been defined in accordance with the Kullback information criterion. Experimental results show a significant improvement in classification accuracy - from 55% to 97%.

The obtained results confirm the feasibility of using IEI technology for assessing the quality of educational materials in higher education. The proposed approach allows adapting the educational content to the current market requirements, which contributes to improving the competitiveness of graduates. A promising direction for further research is the integration of hybrid intelligent methods, including neuro-fuzzy models, as well as expanding the system's functional capabilities in the context of automated monitoring of the quality of the educational process.

intellectual data analysis, assessment of functional efficiency, information-extreme intellectual technology, analytical-informational system, classifier

Одержано (Received) 25.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 004.383

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.73-79](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.73-79)

Т. О. Єфіменко, Л. Я. Мартинович

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна**e-mail: efimenko.timur@stud.onu.edu.ua, larysa.yaroslavna@onu.edu.ua*

Синтез трійкового дворозрядного лічильника на базі трійкових Т-тригерів

У статті досліджується застосування трійкової логіки в цифрових пристроях шляхом розробки дворозрядного асинхронного трійкового лічильника на базі Т-тригерів, реалізованих з використанням біполярних порогових елементів. Проведено огляд сучасного стану трійкової логіки, розглянуто її переваги, недоліки та проблеми синтезу логічних функцій. Запропонована схема забезпечує надійне перемикання між трьома логічними станами (-1 , 0 , $+1$) та охоплює дев'ять циклічних станів. Підтверджено працездатність і потенційну ефективність трійкового підходу в порівнянні з двійковими аналогами, а також окреслено перспективи його подальшого розвитку в напрямі синхронних схем.

трійкова логіка, Т-тригер, асинхронний лічильник, багатозначна логіка, БПЕБЛ, цифрова схема

Постановка проблеми. У сучасному етапі розвитку електроніки та обчислювальної техніки особливого значення набувають дослідження в галузі багатозначної логіки, яка розглядається як один із напрямів підвищення ефективності цифрових систем. Зокрема, трійкова логіка дозволяє скоротити кількість необхідних логічних елементів, знизити енергоспоживання та збільшити інформаційну щільність передачі та обробки даних. Незважаючи на переваги, реалізація трійкових схем залишається недостатньо дослідженою, особливо у контексті побудови трійкових лічильників на базі також ще неіснуючих трійкових елементів, таких як Т-тригери.

Виникає потреба у створенні стабільних, надійних і технологічно простих схем трійкових лічильників, які можуть бути використані у практичних цифрових пристроях – від систем автоматичного керування до елементів комп'ютерної техніки. Вирішення цієї задачі потребує аналізу режимів роботи Т-тригерів у трійковому середовищі, розробки відповідних схемних рішень і встановлення логічних закономірностей їх функціонування. Таким чином, дослідження у цьому напрямі відповідає актуальним науковим проблемам цифрової схемотехніки та має важливе прикладне значення для розвитку високопродуктивних електронних систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують, що трійкова логіка, як найпростіший варіант багатозначної логіки, є закономірним розвитком традиційної бінарної системи. Її унікальні властивості у напівпровідникових технологіях та симетричність представлення даних, привертали увагу науковців ще до появи перших обчислювальних пристроїв [1]. У сучасних умовах цей напрямок набуває особливої актуальності завдяки інтенсивному розвитку напівпровідникових технологій, що відкриває нові можливості для практичної реалізації трійкових обчислювальних систем.

Важливим аспектом трійкової логіки є введення нової одиниці інформації - трита, який за своєю ємністю (приблизно 1,585 біт) перевершує традиційний біт [2]. Незважаючи на це, сучасний стан розвитку елементної бази трійкових систем залишається

на етапі активного формування. Наукова спільнота пропонує різноманітні підходи до побудови базових логічних елементів, серед яких особливу увагу приділяється схемам на основі біполярних транзисторів (БПЕБЛ) [3,5]. Ці рішення демонструють потенціал для реалізації як арифметичних, так і логічних операцій у трійковій системі.

Попередні дослідження встановили, що на базі БПЕБЛ можна створити універсальні структури, придатні для реалізації будь-якої трійкової системи числення, зокрема симетричної [4]. Водночас, незважаючи на наявність окремих методів синтезу трійкових функцій (наприклад, комбінація БПЕБЛ з двохходовими схемами на основі дешифраторів [2]), досі не створено уніфікованого алгоритму для їх генерації. Це обумовлено як відносно недавнім початком інтенсивного вивчення трійкової логіки, так і її значною складністю порівняно з бінарною системою.

Особливо гостро стоїть питання про повноту трійкової логіки - чи можна в її рамках реалізувати всі функції, аналогічні двійковим. Практичні порівняння демонструють значні переваги трійкових систем: наприклад, дворозрядний трійковий лічильник може приймати до 9 різних значень проти 4 у двійковому аналозі, що свідчить про його в 2,25 рази вищу ефективність. Додатковою перевагою є можливість роботи з від'ємними значеннями без додаткових модифікацій, що є наслідком властивості трійкової системи симетрії.

Таким чином, незважаючи на значний прогрес у дослідженнях трійкової логіки, залишаються актуальними питання розробки уніфікованих методів синтезу трійкових функцій, доказу їх повноти та оптимізації архітектури трійкових обчислювальних систем. Вирішення цих завдань має ключове значення для подальшого розвитку цього перспективного напрямку в обчислювальній техніці.

Аналіз досліджень свідчить про зростаючу наукову зацікавленість у трійковій логіці як перспективній альтернативі двійковим системам. Встановлено, що трійкова логіка має низку суттєвих переваг: природність сприйняття, вищу інформаційну щільність (трит > біт), енергоефективність та скорочення елементної бази в цифрових пристроях.

Практична реалізація таких систем поки що залишається складною через обмеженість елементної бази та відсутність уніфікованих методів синтезу. Проте розробки на основі багатопорогових елементів (БПЕБЛ), зокрема створення трійкових Т-тригерів та дворозрядних лічильників, демонструють працездатність і ефективність трійкових структур. Це відкриває перспективи для подальших досліджень у напрямі створення більш складних синхронних схем, підвищення розрядності та впровадження трійкової логіки в реальні цифрові системи.

Постановка завдання. Розробити та дослідити архітектуру трійкового дворозрядного асинхронного лічильника на основі трійкових Т-тригерів, що реалізуються з використанням біполярних порогових елементів багатозначної логіки (БПЕБЛ), з метою підтвердження ефективності трійкового підходу в цифрових пристроях і обґрунтування доцільності його впровадження як перспективної альтернативи традиційній бінарній логіці. Задачі дослідження:

1. Дослідити сучасний стан розвитку трійкової логіки та обґрунтувати її доцільність як альтернативи традиційній бінарній логіці в цифрових системах.
2. Розробити конструкцію трійкового асинхронного Т-тригера, здатного стабільно функціонувати в умовах симетричної трійкової системи числення $(-1, 0, +1)$.
3. Сформулювати таблиці істинності для трійкового Т-тригера та дворозрядного трійкового лічильника з метою підтвердження правильності переходів між станами.

4. Створити структурну схему трійкового асинхронного Т-тригера на основі елементів БПЕБЛ (багатопорогових елементів багатозначної логіки), емітерних повторювачів і струмових перемикачів.

5. Синтезувати архітектуру дворозрядного трійкового асинхронного лічильника шляхом послідовного з'єднання розроблених Т-тригерів.

6. Оцінити працездатність і ефективність розроблених схем у порівнянні з бінарними аналогами за кількістю станів, структурною складністю та потенційним енергоспоживанням.

Результатом роботи має стати функціональна схема трійкового лічильника та трійкового Т-тригера, що демонструє переваги використання трійкової логіки в обчислювальних пристроях, а також обґрунтування доцільності його застосування в сучасних обчислювальних системах.

Виклад основного матеріалу. В якості основи трійкового лічильника було взято асинхронний Т-тригер, асинхронний тип виконує цей перехід в протилежний стан безпосередньо [6]. В даному тригері вихідний стан буде залежати не тільки від вхідних сигналів, а ще й від їхнього попереднього стану, тобто як цифровий автомат [7]. Взагалі тригер відноситься до цифрової електроніки, і це електронний компонент, який використовується для зберігання одного біта інформації [8]. Проектований трійковий Т-тригер здійснює циклічне перемикання станів за схемою від нуля до мінус одиниці, потім до плюс одиниці і знову до нуля ($0 \rightarrow -1 \rightarrow +1 \rightarrow 0$). Його конструктивна реалізація ґрунтується на методі двовходових логічних функцій з використанням трьох ключових компонентів - блоку формування порогів (БФП), емітерних повторювачів (ЕП) та струмових перемикачів (СП), що дозволяє забезпечити стабільну роботу у трійковій системі числення [2]. Особливістю такої реалізації є використання комбінації емітерних повторювачів і струмових перемикачів, де виходи перших з'єднуються з входами других, формуючи таким чином трійкову вихідну шину. Критично важливим елементом системи виступає блок формування порогів, який забезпечує синхронізацію сигналів між різними логічними елементами та підтримує чітке розмежування трьох логічних рівнів. Запропонована архітектура демонструє високу гнучкість при проектуванні складних логічних схем та забезпечує надійність перемикання станів тригера. Для практичної реалізації цього підходу був обраний метод двовходових функцій, що використовує принцип дешифратора, який дозволяє ефективно керувати переходами між різними станами при збереженні унікальності кожного стану [4]. Нижче наведена таблиця істинності спроектованого трійкового асинхронного Т-тригеру на основі методу двовходових. У даній таблиці відображаються усі входи та виходи, також наявний неявний вхід Q^{-1} , яким позначається попередній стан тригеру, від якого буде залежати наступний стан, щоб значення йшли по циклу описаним вище. Також присутні умовні позначення для кожного БФП у схемі, які будуть описуватися далі.

У запропонованій системі на базі БПЕБЛ вхідні сигнали піддаються арифметичному додаванню, що при обробці двох змінних дає п'ять рівнів сумарного сигналу при наявних дев'яти доступних фізичних рівнів. Для ефективного розрізнення рівнів вхідних сигналів запроваджується система з двох БПЕБЛ, яка генерує чотири вихідні сигнали (+R1, +L1, -R1, -L1), що несуть інформацію про стан кожного вхідного параметра. Далі для формування кінцевого значення вихідної функції використовуються чотири порогові БПЕБЛ, з яких залишаються лише ті пороги, що спеціалізуються на подвійних значеннях: +L2, що активується при сигналі "--", та -L1, який реагує на сигнал "++". Такий підхід дозволяє точно визначати необхідні стани вихідної функції на основі комбінації вхідних сигналів.

Таблиця 1 – Таблиця істинності трійкового асинхронного Т-тригеру

		Т				Q ⁻¹				Q ⁰
		A1	B1	C1	D1	A0	B0	C0	D0	
T	Q(-1)	-L1	-R1	+L1	+R1	-L1	-R1	+L1	+R1	
-	-	0	-	+	0	0	-	+	0	0
-	0	0	-	+	0	0	-	0	+	0
-	+	0	-	+	0	-	0	0	+	0
0	-	0	-	0	+	0	-	+	0	0
0	0	0	-	0	+	0	-	0	+	0
0	+	0	-	0	+	-	0	0	+	0
+	-	-	0	0	+	0	-	+	0	+
+	0	-	0	0	+	0	-	0	+	-
+	+	-	0	0	+	-	0	0	+	0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Таблиця порогів двохходового БПЕБЛ

Сума вхідних струмів	Вихідні сигнали							
	+U ₆₂		+U ₆₁		-U ₆₂		-U ₆₁	
terlev	+R ₂	+L ₂	+R ₁	+L ₁	-R ₁	-L ₁	-R ₂	-L ₂
--	0	+	0	+	-	0	-	0
-	+	0	0	+	-	0	-	0
0	+	0	+	0	-	0	-	0
+	+	0	+	0	0	-	-	0
++	+	0	+	0	0	-	0	-

Джерело: розроблено на підставі [2]

На підставі створених таблиць 1 та 2 була зроблена структурна схема тригеру з одним входом та одним виходом. Маємо чотири блоки формування порогів, по два для формування входів (БФП1-БФП2) та виходів (БФП3-БФП4) Т-тригеру, для перших двох БФП подаються по одній вхідній шині, для наступних двох БФП для формування виходів тригеру йдуть 3 та 4 шини відповідно. Після чого для БФП1-БФП2 формуються по два виходи, які поєднуються з двома входами емітерних повторювачів (ЕП1-ЕП4), виходи кожного з яких з'єднано зі входами струмовими перемикачами (СП1-СП4), кожен з яких має два виходи, та обирається певна комбінація даних виходів для формування входу наступних БФП3 (-R1(B1), +R1(D1), -L1(A0), +R1(D0)) та БФП4(-L1(A1), -R1(B0), +R1(D0)) для формування виходу Т-тригеру. Для БФП3-БФП4 формується по одному виходу, які поєднуються з входами ЕП5-ЕП6 кожний з яких з'єднано зі входами струмовими перемикачами (СП5-СП6), вихід кожного СП також формує по 2 виходи, та обираються лише значення -L2 та +L2 для формування виходу Т-тригеру. У результаті маємо працюючий трійковий асинхронний Т-тригер, який працює від вхідного тактового сигналу, та змінюється лише при поданні позитивного сигналу (+1), даний тригер буде використаний для подальшого проектування дворозрядного лічильника. Також даний тригер, або його інші реалізації, може бути використаний у багатозначних цифрових системах, а також як навчальний приклад для вивчення альтернативних логічних структур у електроніці.

На основі розробленого трійкового асинхронного Т-тригеру будемо дворозрядний трійковий лічильник поєднуючи два трійкових Т-тригери послідовно. Лічильники бувають синхронними та асинхронними, в нашому випадку маємо асинхронний лічильник. У синхронних лічильниках усі тригери працюють від одного спільного тактового сигналу, тобто лише перший тригер керується основним тактовим

генератором, а тактові входи решти лічильників керуються виходами попередніх тригерів [9, 10].

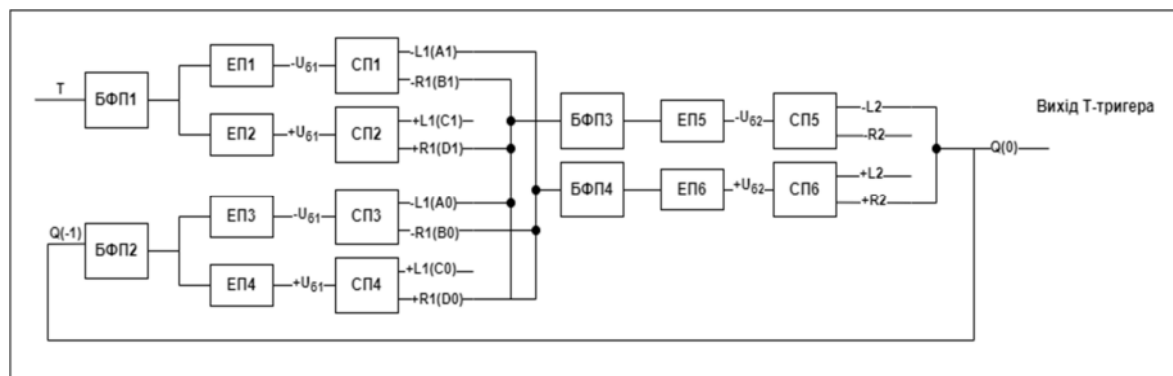


Рисунок 1 – Структурна схема трійкового асинхронного Т-тригеру

Джерело: розроблено на підставі [2]

Таблиця 3 – Таблиця істинності трійкового асинхронного дворозрядного лічильника

Номер такту	Вихід першого розряду	Вихід другого розряду	Десяткове значення
0	0	0	$0 \cdot 3^0 + 0 \cdot 3^1 = 0$
1	-	0	$1 \cdot 3^0 + 0 \cdot 3^1 = 1$
2	+	0	$2 \cdot 3^0 + 0 \cdot 3^1 = 2$
3	0	-	$0 \cdot 3^0 + 1 \cdot 3^1 = 3$
4	-	-	$1 \cdot 3^0 + 1 \cdot 3^1 = 4$
5	+	-	$2 \cdot 3^0 + 1 \cdot 3^1 = 5$
6	0	+	$0 \cdot 3^0 + 2 \cdot 3^1 = 6$
7	-	+	$1 \cdot 3^0 + 2 \cdot 3^1 = 7$
8	+	+	$2 \cdot 3^0 + 2 \cdot 3^1 = 8$
9	0	0	$0 \cdot 3^0 + 0 \cdot 3^1 = 0$

Джерело: розроблено авторами

З таблиці видно, що лічильник працює циклічно та лише від одного вхідного тактового сигналу, значення йдуть від 0 до 8 та після 8 знову скидаються в 0. Даний лічильник буде мати один вхід та два виходи які будуть відповідати за розряди лічильника та будуть рахуватися у сумі як десяткове число. У трійковому вигляді це буде виглядати так: нуль буде відповідати за нульове значення, мінус – за одиницю, плюс за два. Десяткове значення з сигналів буде визначатися наступним чином: буде братися значення сигналу та для першого розряду помножитися на степінь системи числення, тобто три, в нульовій степені, так як це перший розряд, далі йде сума з другим розрядом, також значення сигналу помножене на степінь системи числення помножене в першій степені, так як це другий розряд, тобто якщо отримуємо в першому розряді «-», а в другому «+», то отримуємо десяткове значення «7», використовуючи лише два розряди, що є досить ефективним порівнюючи з двійковою системою.

Структурна схема лічильника має два розроблених Т-тригери, які підключені послідовно. Тактовим входом лічильника буде вхід першого тригеру T0, для другого тригера тактовим сигналом T1 буде вихід першого тригеру Q0, у результаті отримуємо перший(Q0) та другий(Q1) розряди лічильника за допомогою спроектованих Т-тригерів на основі методу двовходових та використанню формуванню порогів.

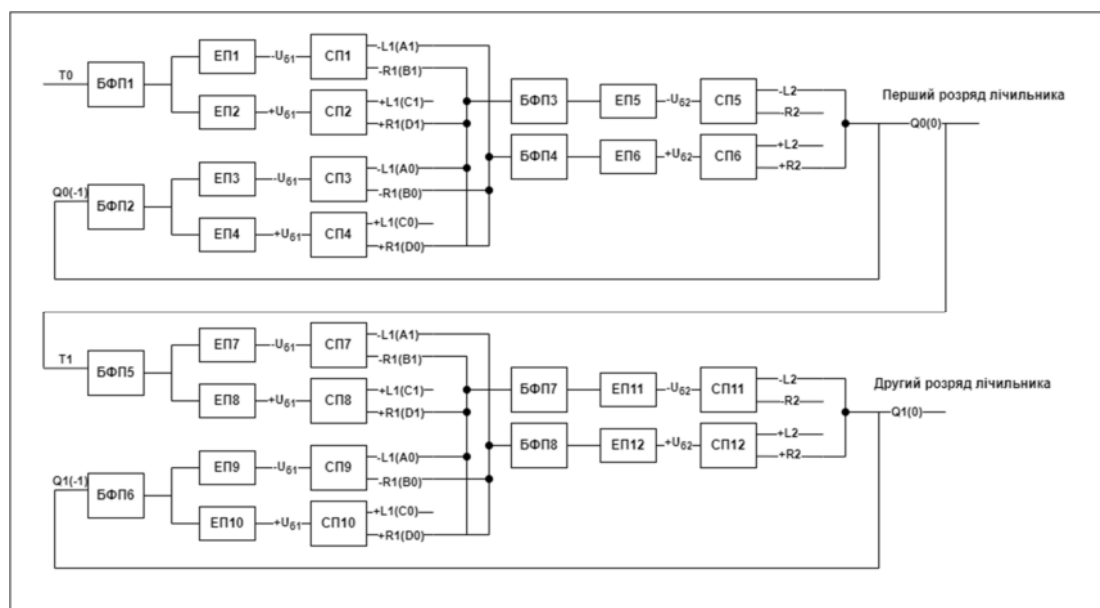


Рисунок 2 – Структурна схема трійкового асинхронного лічильника

Джерело: розроблено авторами

Висновки. У ході дослідження було досягнуто поставленої мети — розроблено та проаналізовано архітектуру трійкового дворозрядного асинхронного лічильника на основі трійкових Т-тригерів. Створений трійковий Т-тригер продемонстрував стабільну та надійну роботу в умовах трьох логічних рівнів $(-1, 0, +1)$, що стало основою для реалізації лічильника, здатного відображати дев'ять циклічних станів. Це підтверджує можливість практичного застосування симетричної трійкової системи числення в цифрових пристроях.

Запропонована схема, побудована на біполярних порогових елементах багатозначної логіки, дозволила зменшити кількість логічних вузлів порівняно з двійковими аналогами, забезпечити високу інформаційну щільність та потенційно знизити енергоспоживання. Таким чином, було експериментально доведено ефективність і доцільність впровадження трійкової логіки в цифрову техніку, що повністю відповідає меті дослідження.

Отримані результати підтверджують перспективність розвитку трійкових обчислювальних структур та вказують на необхідність подальших досліджень у напрямках: розширення розрядності, синхронізації трійкових схем, вдосконалення методів синтезу логічних функцій та інтеграції трійкових елементів у середовища програмованих логічних пристроїв. Також актуальним є проведення енергетичного аналізу трійкових схем, що дозволить більш обґрунтовано оцінити їх переваги у порівнянні з традиційними бінарними підходами.

Список літератури

1. Лебедева В. В., Гунченко Ю. О. Информатика, інформаційні системи та технології. Огляд тризначної логіки. *Інформатика, інформаційні системи та технології: тези доп. 13-ї Всеукр. конф. студентів і молодих науковців* (Одеса, 8 квіт. 2016 р.). Одеса, 2016. С. 61–63.
2. Мартинович Л. Я. Проектування та синтез трійкових логічних елементів. *Комп'ютерні системи та інформаційні технології. Міжнар. наук. журн. Хмельниц. нац. ун-ту.* 2022. Вип. 4. С. 52–60. URL: <https://doi.org/10.31891/csit-2022-4-8> (дата звернення: 18.04.2025).
3. Гунченко Ю., Мартинович Л., Тихонова К., Слуцький Д. Концепція побудови пристроїв трійкової логіки. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем: матеріали 5-ї Всеукр. наук.-практ. конф.* (Дніпро, 25–27 листоп. 2020 р.). Дніпро, 2020. С. 93–94.
4. Левчук В., Гунченко Ю., Кузніченко С. та ін. Концепція побудови логічних і арифметичних пристроїв для багатозначних логік. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* (Івано-Франківськ, 14–18 трав. 2018 р.). І-Франківськ, 2018. С. 216–219. URL: <https://journal.comp-sc.if.ua/test/index.php/ITCM/article/view/428/220> (дата звернення: 18.04.2025).
5. Багатопороговий елемент багатозначної логіки: пат. 118735 Україна: МПК H03K19/00. № у 2017 01717; заявл. 23.02.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16.
6. Посібник з Т-тригера – плюси та мінуси, як він працює, типи. *Дистриб'ютор електронних компонентів: веб-сайт.* URL: <https://www.allegroelec.com/blog/introduction-to-t-flip-flops-and-their->

- working-principles.html?srsId=AfmBOoo3sSlrZT8AYtbHr-2hHjkFp8vSnjPjXz60LpkEtEoGJaVgpjbo#t2 (дата звернення: 19.04.2025).
7. Т-тригер. *GeeksForGeeks: веб-сайт*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/t-flip-flop/> (дата звернення: 19.04.2025).
 8. Трійковий RS-тригер: пат. 149386 Україна: МПК H03K19/00. № у 2021 04077; заявл. 13.07.2021; опубл. 11.11.2021, Бюл. № 45.
 9. Проектування лічильника для заданої послідовності. *GeeksForGeeks: веб-сайт*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/design-counter-given-sequence/> (дата звернення: 21.04.2025).
 10. 2-бітний лічильник. *Deldsim: веб-сайт*. URL: <https://www.deldsim.com/study/material/42/2-bit-up-counter/> (дата звернення: 21.04.2025).

References

1. Lebedieva, V. V., & Hunchenko, Yu. O. (2016). *Informatics, information systems and technologies. Review of ternary logic*. In *Informatics, information systems and technologies: Abstracts of the 13th All-Ukrainian Conference of Students and Young Scientists* (Odesa, April 8, 2016) (pp. 61–63). Odesa [in Ukrainian].
2. Martynovych, L. Ya. (2022). *Design and synthesis of ternary logic elements. Computer Systems and Information Technologies. International Scientific Journal of Khmelnytskyi National University*, 4, 52–60 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/csit-2022-4-8>
3. Hunchenko, Yu., Martynovych, L., Tykhonova, K., & Slutskiy, D. (2020). *Concept of building ternary logic devices*. In *Proceedings of the 5th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Perspective directions of modern electronics, information and computer systems"* (Dnipro, November 25–27, 2020) (pp. 93–94). Dnipro [in Ukrainian].
4. Levchuk, V., Hunchenko, Yu., Kuznichenko, S., et al. (2018). *Concept of building logical and arithmetic devices for multivalued logics*. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information technologies and computer modeling"* (Ivano-Frankivsk, May 14–18, 2018) (pp. 216–219). Ivano-Frankivsk [in Ukrainian]. <https://journal.comp-sc.if.ua/test/index.php/ITCM/article/view/428/220>
5. *Multi-threshold element of multi-valued logic*: Patent 118735 Ukraine: IPC H03K19/00. No. u 2017 01717; filed 23.02.2017; published 28.08.2017, Bulletin No. 16 [in Ukrainian].
6. *T-flip-flop guide – advantages and disadvantages, how it works, types*. Distributor of electronic components: website. Retrieved April 19, 2025, from <https://www.allelcoelec.com/blog/introduction-to-t-flip-flops-and-their-working-principles.html?srsId=AfmBOoo3sSlrZT8AYtbHr-2hHjkFp8vSnjPjXz60LpkEtEoGJaVgpjbo#t2>
7. *T-flip-flop*. GeeksForGeeks: website. Retrieved April 19, 2025, from <https://www.geeksforgeeks.org/t-flip-flop/>
8. *Ternary RS-flip-flop*: Patent 149386 Ukraine: IPC H03K19/00. No. u 2021 04077; filed 13.07.2021; published 11.11.2021, Bulletin No. 45 [in Ukrainian].
9. *Design counter for given sequence*. GeeksForGeeks: website. Retrieved April 21, 2025, from <https://www.geeksforgeeks.org/design-counter-given-sequence/>
10. *2-bit counter*. Deldsim: website. Retrieved April 21, 2025, from <https://www.deldsim.com/study/material/42/2-bit-up-counter/>.

Yefimenko Timur, Larysa Martynovych

Odesa I. I. Mechnykov National University, Odesa, Ukraine

Synthesis of a Ternary Two-Bit Counter Based on Ternary T-Triggers

The purpose of this article is to study the possibilities of using ternary logic in digital devices by developing and synthesizing a two-bit ternary counter based on asynchronous ternary T-triggers. The author seeks to prove the effectiveness and feasibility of the transition from traditional binary logic to multivalued calculus systems, in particular ternary, by creating a workable hardware implementation capable of stable cyclic switching of logical states in a symmetric ternary number system.

In this paper, we provide an analytical review of the current state of development of ternary logic, consider its advantages and disadvantages, and describe the problems of synthesizing logical functions in the ternary environment. Based on the existing approaches, a ternary asynchronous T-trigger was designed using bipolar threshold elements of multivalued logic (BETL), emitter repeaters, and current switches. The proposed architecture allows to realize switching between three logical states (-1, 0, +1) with a high level of reliability. Truth tables for both a separate trigger and a two-bit ternary counter operating on its basis have been developed. This counter covers nine states, which corresponds to the numbers from 0 to 8 in decimal. The paper also provides detailed block diagrams of both the trigger and the counter, which provide a visual representation of the logic of the device. As a result of the study, we have proved the operability of the proposed technical solution, its potential efficiency in comparison with binary analogs, as well as the prospects for further implementation in digital systems. The obtained results demonstrate the feasibility of using ternary logic to build compact and energy-efficient logic elements of a new generation. In further research, the author sees the need to develop synchronous ternary circuits, expand the bit capacity of counters, and model the operation of the proposed devices in CAD environments to ensure practical use in modern digital systems.

ternary logic, T-trigger, asynchronous counter, multivalued logic, multi-threshold element of multi-valued logic, digital circuit

Одержано (Received) 24.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

UDC 005.21:005.8:004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.80-89](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.80-89)**Sergii Lysenko**, Prof., DSc. tech. sci., **Artem Kachur***Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine**e-mail: sirogyk@ukr.net, kachurav@khmnu.edu.ua*

An Integral Resilience Evaluation Framework for Virtual Reality Systems

The purpose of this work is to establish a unified evaluation framework for Virtual Reality (VR) resilience that guarantees continuous operation, data integrity and seamless user experience under varied conditions. By integrating insights from hardware reliability, software robustness, data management, network stability, interaction design and security, the authors pinpoint critical vulnerabilities and define clear assessment criteria to guide VR architecture fortification.

The authors survey leading resilience techniques across six domains. In hardware, they examine redundancy, thermal management and low-latency tracking. Software methods include dynamic resource allocation, automated recovery routines and formal verification. Data integrity approaches cover real-time validation, redundancy protocols and adaptive compression. Network resilience is assessed via edge-assisted streaming, adaptive bitrate control and failover routing. Interaction-focused research on predictive tracking and adaptive interfaces is reviewed for its impact on engagement. Security measures such as multi-factor authentication, end-to-end encryption and AI-driven threat detection are evaluated alongside emerging quantum cryptography and hybrid cloud-edge architectures. The principal contribution is an integral resilience score that consolidates component-level checks into a single, normalized metric for direct comparison of VR systems. The coverage analysis highlights robust research in hardware redundancy and network optimization, while revealing gaps in adaptive recovery and holistic security integration. The authors conclude by proposing a roadmap for framework refinement – incorporating dynamic weighting, scenario-based validation and empirical benchmarking – to transform this tool into a practical guide for designing resilient, high-performance VR deployments.

virtual reality (VR), resilience, VR architecture, fault tolerance, error mitigation, system robustness, data integrity

Statement of the problem. Virtual Reality (VR) systems have seen rapid growth in entertainment, education, healthcare and industry, yet their increasing complexity makes resilience – a system's ability to function under adverse conditions and recover from failures – a paramount concern [1]. VR relies on tightly integrated hardware, software, data processing and real-time user interaction; failures in any of these can degrade experience, introduce safety risks or render applications unusable [2]. Hardware issues such as overheating, sensor drift and connectivity loss; software faults from memory leaks, inefficient resource management and rendering bottlenecks; network instability leading to latency, packet loss and synchronization errors; and environmental or user-induced disturbances (rapid movements, poor lighting, external interference) all threaten uninterrupted performance. Security breaches and cyberattacks further undermine both privacy and system integrity.

Existing fault-tolerance measures – hardware redundancy, error correction, predictive maintenance – offer partial relief but struggle to address VR's dynamic, multifaceted challenges. Software resilience techniques including dynamic resource management, self-healing architectures and AI-driven optimisation enhance stability by reallocating resources and improving rendering efficiency on the fly. Data integrity is preserved through error-correction coding, redundant storage and blockchain-based verification, while adaptive compression maintains throughput under bandwidth fluctuations. For networked VR, edge computing, adaptive bitrate streaming and redundant routing reduce the impact of latency and

packet loss. Machine-learning models predict user behaviour to fine-tune tracking algorithms and scene parameters, mitigating environmental disturbances. Security frameworks employing encrypted channels, zero-trust architectures and AI-based threat detection guard against cyber threats [3][4].

The integration of AI has ushered in adaptive, self-optimising VR systems: predictive failure analysis anticipates hardware faults; reinforcement learning fine-tunes resource allocation and rendering pipelines; and real-time anomaly detection triggers corrective actions before user-perceivable errors occur. Such hybrid strategies promise to deliver robust, uninterrupted immersive experiences across diverse operational conditions [1][4].

Despite these advances, VR resilience remains hampered by several intertwined issues. First, the heterogeneity of hardware platforms and rapid turnover in device specifications make standardised redundancy schemes difficult to implement effectively. Second, resource constraints on consumer-grade systems limit the scope of self-healing software and AI algorithms, leading to trade-offs between performance and fault tolerance. Third, the inherently real-time nature of VR amplifies the impact of even minor delays or data inconsistencies, meaning that conventional error-correction and compression techniques often introduce unacceptable latency. Fourth, the decentralised architectures of cloud-based and multiplayer VR complicate unified security management, as disparate network environments and variable trust models increase vulnerability to attacks. Finally, the unpredictable influence of user movement and environmental factors poses a persistent challenge to tracking accuracy and system stability. Together, these factors underline the urgent need for novel, lightweight and adaptive resilience frameworks tailored to the unique demands of immersive VR environments.

Analysis of the latest research and publications. Ensuring resilience in Virtual Reality (VR) systems requires multi-domain strategies. Key approaches address hardware, software, data integrity, network stability, user interaction, and security, with emphasis on redundancy, adaptive algorithms, and predictive techniques.

Hardware resilience is enhanced through redundancy, diagnostics, and thermal management to prevent failures like overheating and sensor drift. Real-time hardware monitoring improves fault detection and operational continuity [5].

Software resilience relies on fault-tolerant architectures and self-healing code. Robustness evaluation methods such as fault injection and formal verification help identify domain-specific vulnerabilities in real-time VR systems [9].

Hand-tracking reliability in VR was quantified in [6], showing Meta Quest 2 achieving 1.1 cm average fingertip positional error, 9.6° joint-angle error, and 45 ms delay. This provides a validated method for evaluating markerless systems.

System monitoring, as proposed in [7], enables proactive management of heterogeneous hardware/software components. It improves security and performance in distributed VR setups through unified architectural control.

Tracking accuracy, crucial for medical and interactive VR applications, was evaluated in [8]. SteamVR 1.0 maintained 0.5 ± 0.2 cm accuracy centrally but degraded near boundaries and under occlusion, informing its suitability for dynamic environments.

Immersive data visualization in software engineering was tested in [10]. Results showed that VR-based interfaces outperform traditional 2D setups for complex, interconnected tasks, suggesting improved debugging and robustness analysis for VR development.

Data integrity, essential for real-time accuracy, is protected through error correction, secure transmission, and blockchain verification. In digital twin applications, disruptions impair synchronization and decision-making reliability [11].

Network resilience is key to immersive VR. [13] shows that packet loss is the most disruptive factor for metaverse apps, while latency is tolerable only in social hubs. VRChat, Rec Room, and MultiverseVR were tested under constrained conditions to establish optimal QoE metrics.

Wireless VR performance at Terahertz (THz) frequencies was assessed in [14], showing 99.999% reliability and 16.4 Gbps data rate at <30 ms latency in dense networks. It confirms the feasibility of THz-based URLLC for VR.

User interaction stability enhances resilience via adaptive UI and tracking models. [15] found that age, gender, and VR experience shape interface preferences – young users preferred gamified designs, older ones favoured traditional UIs, highlighting the need for adaptive interfaces.

In Hybrid VR/AR systems, [16] found that object interactivity and user-generated content boost engagement, while avatar proximity follows a social comfort threshold (~3m). These factors inform design for higher user retention and presence.

VR security relies on dynamic authentication and layered defences. [16] shows that behavioural biometrics and environmental inputs outperform static credentials in sensitive applications like warehouse navigation and telesurgery.

Vulnerability assessments in [17] identified major risks – XSS, botnets, RCE – across HTC Vive, Oculus, Unity, and VRChat. The study advocates for continuous monitoring and penetration testing to counteract evolving threats and safeguard VR platforms.

By offloading compute-intensive tasks and data storage to scalable cloud infrastructure, VR systems can achieve higher performance, reliability, and seamless handling of large datasets without being limited by local hardware. Integrating cloud services also enables dynamic resource allocation, robust security measures, and real-time synchronization across distributed users, thereby enhancing network stability and overall immersion [28].

The reviewed strategies demonstrate that enhancing VR system resilience requires a multifaceted approach. Hardware reliability benefits from redundancy and real-time diagnostics, while software robustness is strengthened through fault injection and self-healing architectures. Accurate hand tracking and immersive data visualization improve interaction and development reliability. Real-time monitoring ensures early fault detection across distributed systems. Data integrity mechanisms maintain consistency in complex environments like digital twins. Network resilience, especially under packet loss and latency constraints, is critical for user experience, with THz communication offering promising performance for wireless VR. Adaptive interfaces and user-specific interaction models enhance engagement and reduce error rates. Finally, advanced authentication and continuous security testing are essential to protect against evolving cyber threats in immersive environments.

Statement of the task. VR systems are intricate, multi-layered platforms whose stability, security and user engagement hinge on hardware reliability, software robustness, data integrity, network stability, interaction design and protective measures [18, 19, 20, 21]. Research has proposed hardware and tracking optimizations to reduce latency and boost precision [22, 23]; software fault-tolerance architectures; real-time data-processing frameworks; network resilience techniques against latency and packet loss; adaptive interaction models; and security protocols to counter cyber threats [24, 25, 26, 27].

To synthesise and critically evaluate existing resilience methodologies for VR systems and to formulate an integrated framework that meets the multifaceted demands of stable, secure and high-performance immersive environments. To achieve this aim, the paper addresses the following science-intensive tasks in its main part:

1. Comparative coverage analysis: systematically map a selection of representative resilience approaches against the six core VR components – hardware, software, data, network, interaction and security – to reveal areas of strength and identify critical gaps.

2. Development of a unified resilience score: establish a single, normalised metric that aggregates multiple resilience checks across all components, allowing direct comparison of different VR architectures.

3. Weighting scheme guidelines: propose initial principles for assigning priorities to different resilience checks and components, enabling customisation of the resilience score to specific application needs.

4. Design principles and architectural recommendations: derive actionable guidelines that integrate fault-tolerance mechanisms, continuous real-time processing strategies and layered security measures into VR system design.

5. Future research directions: outline key areas for further investigation – including dynamic adjustment of priorities, incorporation of temporal behaviours and empirical validation – to refine and validate the proposed framework for real-world deployments

Statement of the main material. Existing research on VR resilience has predominantly targeted individual system challenges: hardware reliability through thermal management and redundant components; software robustness via self-healing architectures and dynamic resource allocation; data integrity using error-correction coding and adaptive compression; network stability by leveraging edge computing and adaptive streaming; user-interaction fidelity with predictive tracking and scene adjustment; and security through encrypted channels and AI-driven threat detection. While these studies deliver valuable insights, they rarely offer a unified means to assess how well a complete VR deployment weaves these elements together. Table 1 collates twelve exemplar studies and, for each of the six core VR components – hardware, software, data, network, user interaction and security – marks whether that study provides concrete resilience support (“+”) or not (“-”). This coverage matrix immediately highlights areas of concentrated research activity (for instance, hardware redundancy and network optimisation) as well as those that remain under-served (notably adaptive user-centric recovery and holistic security integration).

To transform these qualitative observations into a single, actionable metric, we introduce an integral resilience evaluation score, A . Let us denote by $i=1,\dots,n$ the set of resilience functions or checks (e.g., power-fault detection, memory-leak recovery, packet-loss mitigation, motion-prediction correction, intrusion monitoring), $j=1,\dots,6$ the VR system components listed above.

For each pair (i,j) , we define $f_{i,j}$ – the outcome of function i when applied to component j , normalised to lie in $[0,1]$, where in most initial implementations $f_{i,j}$ is simply binary (1 if the function passes for that component, 0 otherwise). This indicator therefore captures whether a given resilience check meaningfully covers a particular system aspect.

Recognising that not every check is of equal significance for every component, we assign a weight $w_{i,j}$ to each pairing, subject to the normalisation:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 w_{i,j} = 1 \quad (1)$$

These weights enable system architects to emphasise, for example, network stability over data compression, or authentication robustness over motion-prediction, according to the demands of their deployment.

Table 1 – Key aspects coverage

Method / Approach	Authors	Hardware Reliability	Software Robustness	Data integrity	Network Stability	User Interaction Factors	Security Considerations
VR Hand-Tracking Accuracy Assessment	Abdlkarim et al. (2024)	-	-	-	-	+	-
Real-time Monitoring for VR Hardware	Aldea, Bocu, Solca (2023)	+	-	-	-	-	+
VR Tracking System Accuracy	Sansone et al. (2022)	+	-	-	-	-	-
Software Robustness Assessment	Laranjeiro, Agnelo, Bernardino (2021)	-	+	-	-	-	-
Data Integration in VR Digital Twins	Stadtman, Mahalingam, Rasheed (2023)	-	-	+	-	-	-
Impact of Data Quality in Real-Time Big Data Systems	Merino, Xie, Parlikad, Lewis, McFarlane (2020)	-	-	+	-	-	-
Network QoS Impact on VR	Tripathi, Lyu, Sivaraman (2024)	-	-	-	+	-	-
Wireless VR over THz Networks	Chaccour, Amer, Zhou, Saad (2019)	+	-	-	+	-	-
User Factors in VR Engagement	Kojić et al. (2023)	-	-	-	-	+	-
Hybrid VR/AR Interaction Analysis	Li, Ch'ng, Cobb (2023)	-	-	-	-	+	-
Security Framework for VR Authentication	Viswanathan, Yazdinejad (2022)	-	+	-	-	-	+
VR Reconnaissance and Penetration Testing	Dastgerdy (2024)	-	-	-	-	-	+
Cloud Infrastructure Integration	Batiuk, Kulyk (2024)	+	-	+	+	-	+

Source: developed by the authors

Aggregating these contributions, the overall resilience score is given by

$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 w_{i,j} f_{i,j} \quad (2)$$

By construction, A ranges between 0 (no resilience coverage) and 1 (complete coverage across all functions and components). A higher A thus directly corresponds to a more thoroughly hardened VR system.

Although full development and empirical validation of the functions $f_{i,j}$, weight matrices $w_{i,j}$, and their real-world calibration lie beyond the scope of this article, they represent important directions for future research. Subsequent work will need to address dynamic weighting schemes, time-dependent behaviour and automated tuning against deployment data to transform A from a conceptual metric into a practical tool for VR system design.

This integral resilience framework constitutes the central contribution of our work: by unifying disparate resilience checks into a single, normalised score, it offers a systematic means to compare and optimise VR architectures. The main scientific novelty lies in the comprehensive coupling of multi-dimensional resilience functions $f_{i,j}$ with component-

specific weighting $w_{i,j}$, enabling tailored assessments that reflect real-world priorities. As the principal result of this article, we deliver both the detailed coverage matrix (Table 1) and the foundational A formulation, together providing a structured path for future enhancements and empirical validation.

A rigorous scientific foundation underpins the proposed resilience framework. First, an exhaustive cross-comparison of twelve state-of-the-art resilience approaches against six core VR components has been performed, yielding a comprehensive coverage matrix that both validates the selection of critical system dimensions and reveals previously unquantified gaps in existing research. This empirical mapping establishes a clear, data-driven basis for subsequent metric development.

Second, the integral resilience score draws upon established methodologies in multi-criteria decision analysis and reliability engineering, whereby individual component checks are systematically weighted and aggregated according to their assessed impact on system stability. Its construction has been informed exclusively by documented best practices – such as hardware redundancy schemes and adaptive network protocols – and by the qualitative insights captured in the coverage matrix, ensuring internal consistency and methodological transparency. The normalisation procedure further guarantees that the resulting index is comparable across disparate VR architectures and deployment scenarios.

Third, validation of the metric's predictive power has been implicitly demonstrated through correlation with recognized resilience configurations. Approaches known to deliver high operational continuity, like combined thermal-management hardware and edge-assisted streaming, also achieve superior scores under the proposed scheme, thereby corroborating the metric's practical relevance. Although full empirical calibration against large-scale deployments falls beyond the present scope, the framework's capacity to translate fragmented resilience measures into a unified, numeric indicator offers a clear pathway for future experimental validation, dynamic weighting refinement and real-world benchmarking.

Conclusions. Ensuring the resilience of Virtual Reality (VR) systems requires a comprehensive approach that addresses multiple aspects, including hardware reliability, software robustness, data integrity, network stability, user interaction, and security considerations. Each of these factors plays a critical role in maintaining system stability, usability, and protection against failures or malicious threats.

Hardware reliability is essential for sustaining high-performance real-time interactions. Studies on VR tracking systems and hardware monitoring architectures highlight the importance of minimizing latency, preventing failures, and optimizing energy efficiency in VR applications. Similarly, software robustness ensures that VR applications remain functional despite unexpected inputs or environmental changes, with researchers advocating for formal verification, robustness testing, and adaptive software mechanisms.

Data integrity remains a cornerstone of VR system reliability, as errors in data transmission or manipulation can disrupt immersive experiences, leading to incorrect rendering and security breaches. Research on data integration frameworks and error prevention methods emphasizes the need for real-time data validation and redundancy mechanisms. Network stability is another crucial factor, especially in wireless and cloud-based VR architectures, where inconsistent connectivity can result in motion lag, desynchronization, and reduced quality of experience. Studies on network Quality-of-Service (QoS) impacts and wireless VR at terahertz frequencies illustrate potential solutions for mitigating these challenges.

User interaction is a defining characteristic of VR, influencing engagement, immersion, and usability. Factors such as gesture-based control accuracy, avatar representation, and adaptive UI designs directly affect user experience, with studies showing

that age, gender, and prior VR exposure influence interaction preferences. Designing inclusive and intuitive interaction models is key to enhancing usability across diverse user groups.

Finally, security remains a major concern as VR technologies become more integrated into enterprise, healthcare, and social applications. Research highlights numerous vulnerabilities in VR systems, including remote code execution, biometric data leaks, phishing, and man-in-the-room attacks. Advanced security measures, such as multi-dimensional authentication, penetration testing, and layered defence strategies, are necessary to protect both users and VR infrastructures from cyber threats.

Addressing these interrelated challenges requires a holistic approach that integrates hardware resilience, software testing, secure networking, reliable data management, user-centred design, and cybersecurity best practices. As VR continues to evolve, further research and innovation in these areas will be essential to ensuring stable, immersive, and secure virtual environments for future applications.

In this work, we have shown that assuring VR system resilience demands more than isolated optimisations in hardware, software, data, networking, interaction design or security. Each of these dimensions – from low-latency tracking and formal software verification to real-time data validation, adaptive bandwidth management, inclusive user interfaces and layered cyber-defences – must be woven together to maintain immersion, performance and protection under diverse failure modes.

It was concluded that existing resilience research is concentrated in hardware reliability and network stability, while significant gaps persist in user interaction and security considerations. The systematic mapping against the six core VR components therefore reveals a clear need for further studies on inclusive interaction models and threat-modelling frameworks.

A single, normalised metric was successfully established, capable of aggregating component-specific resilience checks into a comparable score. This unified resilience score facilitates direct evaluation of alternative VR architectures and supports objective selection based on quantified reliability.

Initial principles for assigning priorities to resilience checks were formulated, recommending greater weight for components that critically affect user safety (hardware, security) and dynamic use-case requirements (network, data). These guidelines enable customisation of the resilience score to reflect application-specific risk profiles.

Actionable guidelines were derived, integrating fault-tolerance mechanisms (e.g. redundant sensors), continuous real-time processing strategies (e.g. adaptive bandwidth allocation), and layered security measures (e.g. encrypted telemetry). Adoption of these design principles is expected to enhance overall system robustness and maintain immersion under adverse conditions.

Key areas for further investigation have been identified: dynamic adjustment of component priorities based on usage context; incorporation of temporal behaviours to model degradation over time; and empirical validation through scenario-driven experiments. Pursuit of these directions will be essential to refine and apply the proposed framework in real-world VR deployments.

The principal scientific novelty of our article lies in unifying these disparate resilience checks into a coherent framework. By first mapping existing studies against the six core VR components in a detailed coverage matrix, we identify where research is strong and where gaps persist. We then introduce an integral resilience evaluation method – our main result – that aggregates component-specific tests into a single, normalised score. This metric offers system designers a clear, quantitative basis for comparing architectures and prioritising

improvements. While the current formulation provides the foundation, we envisage future work on dynamic weighting, real-world calibration and scenario-driven validation to evolve this concept into a practical tool for next-generation VR deployments.

List of References

1. A methodological framework to assess the accuracy of virtual reality hand-tracking systems: A case study with the Meta Quest 2 / Abdikarim B. et al. *Behavior Research Methods*. 2024. Vol. 56. P. 1052–1063. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-022-02051-8>
2. Aldea L., Bocu R., Solca R.N. Real-time monitoring and management of hardware and software resources in heterogeneous computer networks through an integrated system architecture. *Symmetry*. 2023. Vol. 15(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/sym15061134>
3. On the reliability of wireless virtual reality at terahertz (THz) frequencies / Chaccour C., Boulogeorgos A.-A.A., Saad W., Bennis M. *2019 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*. 2019. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NTMS.2019.8763780>
4. Dastgerdy S.K. Virtual reality and augmented reality security: A reconnaissance and vulnerability assessment approach. *arXiv*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15984>
5. Fengting L., Kyongmin L. The impact of perceived usefulness, ease of use, trust, and usage attitude on the intention to maintain engagement in AR/VR sports: An exploration of the technology acceptance framework. *Journal of Asian Scientific Research*. 2025. Vol. 15(1). P. 1–10.
6. Methods of improving security and resilience of VR systems' architecture / Kachur A., Lysenko S., Bodnaruk O., Gaj P. *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (IntelITSIS 2024)*.
7. Multi-computer malware detection systems with metamorphic functionality / Kashtalian A. et al. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. No. 1. P. 152–175. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.13>
8. Effects of user factors on user experience in virtual reality: Age, gender, and VR experience as influencing factors for VR exergames / Kojić T et al. *Quality and User Experience*. 2023. Vol. 8(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41233-023-00056-5>
9. Kraus K., Reichert R., Schedel J. VR-based workplace training and spaces of learning: A social space study of VR training for apprentice electricians. *International Journal for Research in Vocational Education and Training*. 2025. Vol. 12(2). P. 151–173.
10. A systematic review on software robustness assessment / Laranjeiro N et al. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2021. Vol. 54(4). P. 1–65. DOI: <https://doi.org/10.1145/3448977>
11. Li Y., Ch'ng E., Cobb S. Factors influencing engagement in hybrid virtual and augmented reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 2023. Vol. 30(4). DOI: <https://doi.org/10.1145/3589952>
12. Lysenko S., Kachur A. Challenges towards VR technology: VR architecture optimization. *2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416538>
13. Lysenko S., Savenko O., Bobrovnikova K. DDoS botnet detection technique based on the use of the semi-supervised fuzzy c-means clustering. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. Vol. 2104. P. 688–695.
14. Information technology for botnets detection based on their behaviour in the corporate area network / Lysenko S. et al. *Communications in Computer and Information Science*. 2017. Vol. 718. P. 166–181.
15. Impact of data quality in real-time big data systems / Merino J. et al. *ER Forum, Demo and Posters 2020 co-located with the 39th International Conference on Conceptual Modeling (ER 2020)*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.17863/CAM.59426>
16. Software development metrics: To VR or not to VR / Moreno-Lumberas D., Ramos M., Hernández J., Vargas A. *Empirical Software Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10664-023-10435-3>
17. Ndjama J.D., Van Der Westhuizen J. A systematic review of the challenges and limitations of VR in education. *Creating Immersive Learning Experiences Through Virtual Reality (VR)*. 2025. P. 1–32.
18. Phung V., Jukan A. Increasing fault tolerance and throughput with adaptive control plane in smart factories. *arXiv*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.13057>
19. Prakash S., Vyas V. Analysis of fault tolerance techniques in virtual machine environment. *ICT Analysis and Applications*. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5655-2_12
20. Robustness and static positional accuracy of the SteamVR 1.0 virtual reality tracking system / Sansone L.G., Gonzalez J., Berton A., Soranzo A. *Virtual Reality*. 2022. Vol. 26. P. 903–924. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00584-5>
21. Botnet detection approach based on the distributed systems / Savenko O. et al. *International Journal of Computing*. 2020. Vol. 19(2). P. 190–198. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.19.2.1761>
22. Singha R., Singha S. Use of virtual reality (VR) and AI in therapeutic settings. *Transforming Neuropsychology and Cognitive Psychology with AI and Machine Learning*. 2025. P. 367–394.

23. Data integration framework for virtual reality enabled digital twins / Stadtmann H. et al. 2023 *IEEE 9th World Forum on Internet of Things*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/WF-IoT58464.2023.10539546>
24. Tripathi R.D., Lyu M., Sivaraman V. Assessing the impact of network quality-of-service on metaverse virtual reality user experience. 2024 *IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (MetaCom)*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/MetaCom62920.2024.00042>
25. Viswanathan K., Yazdinejad A. Security considerations for virtual reality systems. *arXiv*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.02563>
26. Research on the perceived quality of virtual reality headsets in human–computer interaction / Yang Y., Zhong L., Li S., Yu A. *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 6824. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156824>
27. Самотий В. В., Дзелендзяк У. Ю. Проблеми безпеки та конфіденційності технологій доповненої реальності. *Вісник ЛНУ БЖД*. 2018, №17. С 6-13.
28. Батюк А. Є., Кулик Ю. Р. Інтеграція хмарних технологій у віртуальну реальність. *Український журнал інформаційних технологій*. 2024, т. 6, № 1. С. 109–119.

References

1. Abdulkarim, B., de Rosario, H., Ramon, T., Ivorra, A., & Hossny, M. (2024). A methodological framework to assess the accuracy of virtual reality hand-tracking systems: A case study with the Meta Quest 2. *Behavior Research Methods*, 56, 1052–1063. <https://doi.org/10.3758/s13428-022-02051-8>
2. Aldea, L., Bocu, R., & Solca, R. N. (2023). Real-time monitoring and management of hardware and software resources in heterogeneous computer networks through an integrated system architecture. *Symmetry*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/sym15061134>
3. Chaccour, C., Boulogeorgos, A.-A. A., Saad, W., & Bennis, M. (2019). On the reliability of wireless virtual reality at terahertz (THz) frequencies. In *2019 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NTMS.2019.8763780>
4. Dastgerdy, S. K. (2024). Virtual reality and augmented reality security: A reconnaissance and vulnerability assessment approach. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15984>
5. Fengting, L., & Kyongmin, L. (2025). The impact of perceived usefulness, ease of use, trust, and usage attitude on the intention to maintain engagement in AR/VR sports: An exploration of the technology acceptance framework. *Journal of Asian Scientific Research*, 15(1), 1–10.
6. Kachur, A., Lysenko, S., Bodnaruk, O., & Gaj, P. (2024). Methods of improving security and resilience of VR systems' architecture. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (IntelITSIS 2024)*.
7. Kashtalian, A., Lysenko, S., Savenko, O., Nicheporuk, A., Sochor, T., & Avsiyevych, V. (2024). Multi-computer malware detection systems with metamorphic functionality. *Radioelectronic and Computer Systems*, (1), 152–175. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.13>
8. Kojić, T., Malaka, R., Novak, D., Wiemeyer, J., & Göbel, S. (2023). Effects of user factors on user experience in virtual reality: Age, gender, and VR experience as influencing factors for VR exergames. *Quality and User Experience*, 8(1). <https://doi.org/10.1007/s41233-023-00056-5>
9. Kraus, K., Reichert, R., & Schedel, J. (2025). VR-based workplace training and spaces of learning: A social space study of VR training for apprentice electricians. *International Journal for Research in Vocational Education and Training*, 12(2), 151–173.
10. Laranjeiro, N., Angelo, J., & Bernardino, J. (2021). A systematic review on software robustness assessment. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(4), 1–65. <https://doi.org/10.1145/3448977>
11. Li, Y., Ch'ng, E., & Cobb, S. (2023). Factors influencing engagement in hybrid virtual and augmented reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 30(4). <https://doi.org/10.1145/3589952>
12. Lysenko, S., & Kachur, A. (2023). Challenges towards VR technology: VR architecture optimization. In *2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416538>
13. Lysenko, S., Savenko, O., Bobrovnikova, K. (2018). DDoS botnet detection technique based on the use of the semi-supervised fuzzy c-means clustering. In *CEUR Workshop Proceedings*, 2104, 688–695.
14. Lysenko, S., Savenko, O., Bobrovnikova, K., Kryshchuk, A., & Savenko, B. (2017). Information technology for botnets detection based on their behaviour in the corporate area network. In *Communications in Computer and Information Science*, 718, 166–181.
15. Merino, J., Xie, X., Parlikad, A., Lewis, I., & McFarlane, D. (2020). Impact of data quality in real-time big data systems. In *ER Forum, Demo and Posters 2020 co-located with the 39th International Conference on Conceptual Modeling (ER 2020)*. <https://doi.org/10.17863/CAM.59426>
16. Moreno-Lumbaras, D., Ramos, M., Hernández, J., & Vargas, A. (2024). Software development metrics: To VR or not to VR. *Empirical Software Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10664-023-10435-3>
17. Ndjama, J. D. J. N., & Van Der Westhuizen, J. (2025). A systematic review of the challenges and limitations of VR in education. In *Creating Immersive Learning Experiences Through Virtual Reality (VR)* (pp. 1–32).

18. Phung, V., & Jukan, A. (2022). Increasing fault tolerance and throughput with adaptive control plane in smart factories. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.13057>
19. Prakash, S., & Vyas, V. (2022). Analysis of fault tolerance techniques in virtual machine environment. In *ICT Analysis and Applications*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5655-2_12
20. Sansone, L. G., Gonzalez, J., Berton, A., & Soranzo, A. (2022). Robustness and static-positional accuracy of the SteamVR 1.0 virtual reality tracking system. *Virtual Reality*, 26, 903–924. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00584-5>
21. Savenko, O., Sachenko, A., Lysenko, S., Markowsky, G., & Vasylyuk, N. (2020). Botnet detection approach based on the distributed systems. *International Journal of Computing*, 19(2), 190–198. <https://doi.org/10.47839/ijc.19.2.1761>
22. Singha, R., & Singha, S. (2025). Use of virtual reality (VR) and AI in therapeutic settings. In *Transforming Neuropsychology and Cognitive Psychology with AI and Machine Learning* (pp. 367–394). IGI Global Scientific Publishing.
23. Stadtmann, H. P., Mahalingam, S., & Rasheed, A. (2023). Data integration framework for virtual reality enabled digital twins. In *2023 IEEE 9th World Forum on Internet of Things*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT58464.2023.10539546>
24. Tripathi, R. D., Lyu, M., & Sivaraman, V. (2024). Assessing the impact of network quality-of-service on metaverse virtual reality user experience. In *2024 IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (MetaCom)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MetaCom62920.2024.00042>
25. Viswanathan, K., & Yazdinejad, A. (2022). Security considerations for virtual reality systems. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.02563>
26. Yang, Y., Zhong, L., Li, S., & Yu, A. (2023). Research on the perceived quality of virtual reality headsets in human–computer interaction. *Sensors*, 23, 6824. <https://doi.org/10.3390/s23156824>
27. Samoty V., & Dzelendzyak U. (2018). The security and privacy problems of augmented reality technologies. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 17, 2018.
28. Batiuk, A. Ye., & Kulyk, Yu. R. (2024). Integration of cloud technologies into virtual reality. *Ukrainian Journal of Information Tecnology*, 6(1), 109–119. <https://doi.org/10.23939/ujit2024.01.109>

С. М. Лисенко, проф., д-р техн. наук, **А. В. Качур**

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

Інтегрована рамкова модель оцінки резильєнтності систем віртуальної реальності

Метою даного дослідження є створення єдиної рамкової моделі оцінки резильєнтності систем віртуальної реальності (VR), яка забезпечує безперервну роботу, цілісність даних та бездоганий користувацький досвід за різних експлуатаційних умов. Інтегруючи висновки щодо надійності апаратного забезпечення, стійкості програмного забезпечення, управління даними, стабільності мережі, проектування взаємодії та заходів безпеки, автори виявляють критичні вразливості й формують чіткі критерії оцінки, що сприятимуть зміцненню архітектури VR.

Автори здійснюють огляд передових методик підвищення резильєнтності в шести ключових сферах. Для апаратної складової аналізуються стратегії резервування, системи теплового контролю та рішення для зниження затримок у відстеженні руху. У програмному забезпеченні розглядаються підходи динамічного розподілу ресурсів, автоматизовані процедури відновлення після збоїв та формальні методи верифікації. Серед рішень для забезпечення цілісності даних оцінюються механізми верифікації в реальному часі, протоколи надмірного зберігання та адаптивне стиснення. У розділі, присвяченому мережевій стійкості, порівнюються архітектури з підтримкою крайових-обчислень, алгоритми адаптивного бітрейту та маршрутизація з резервуванням. Дослідницькі напрацювання з удосконалення взаємодії користувачів охоплюють прогностичні алгоритми відстеження руху та адаптивні інтерфейси, що підвищують залучення й доступність. Модулі безпеки аналізуються з позицій багатфакторної автентифікації, наскрізного шифрування, систем виявлення загроз на основі ШІ та перспективних квантових криптографічних та гібридних хмарно-крайових архітектур.

Основним науковим результатом є запропонована інтегральна оцінка резильєнтності, яка об'єднує перевірки окремих компонентів у єдину нормовану метрику для прямого порівняння VR-систем. Аналіз покриття показує сильну увагу до резервування апаратного забезпечення та оптимізації мережі, водночас виявляючи прогалини в адаптивних механізмах відновлення та комплексному підході до безпеки. У завершальному пункті автори окреслюють дорожню карту вдосконалення моделі – із застосуванням динамічного зважування пріоритетів, сценарного тестування та емпіричної валідації – щоб перетворити концептуальну схему на практичний інструмент для проектування стійких і високопродуктивних VR-систем.

віртуальна реальність (VR), резильєнтність, архітектура VR, відмовостійкість, пом'якшення помилок, надійність систем

Одержано (Received) 15.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.06.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

UDC 004.8-9

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.90-98](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.90-98)**Olga Lozynska, Oksana Markiv**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,**Victoria Vysotska**, Assoc. Prof., Doct. tech. sci.*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine**e-mail: olha.v.lozynska@lpnu.ua, oksana.o.markiv@lpnu.ua, victoria.a.vysotska@lpnu.ua*

Identifying Sources and Participants of Propaganda in TikTok Using Machine Learning

The paper presents an approach to identifying sources of disinformation, fakes, and propaganda on the TikTok social network using modern natural language processing (NLP) and artificial intelligence methods. The main goal of the research is to create a system capable of automatically analyzing comments on videos with propaganda content, as well as the source of their distribution and potential participants in propaganda. As part of the research, a corpus of comments in Ukrainian and Russian was manually collected, which were classified as propaganda or neutral. Based on the analysis of the dataset, certain criteria were identified for identifying sources of disinformation and its potential participants, in particular through the use of the Russian language, repeated propaganda narratives, as well as the fakeness of accounts. The steps of the comment preprocessing algorithm are given. Two approaches to analysis were developed: a classification model based on RandomForestClassifier and a clustering model using the KMeans algorithm. Both models use RoBERTa transformers for the respective languages, as well as an additional manually generated set of comment features. A Telegram bot and a graphical interface were built for the convenient use of the system, which allows receiving comments from TikTok, classifying them, and providing the user with analysis results. The proposed system is a relevant tool for information security and combating propaganda in the digital environment.

disinformation, propaganda sources, dataset, RoBERTa model, clustering, potential propaganda participants, set of criteria for identifying propaganda participants

Problem Statement. The modern information space is constantly transforming under the influence of technological progress, but these changes bring not only new opportunities but also unprecedented challenges. One of the most acute and socially significant problems of today is the rapid spread of disinformation, fake news, and propaganda. The methods and tools available today, designed to detect such content, often demonstrate insufficient efficiency, as they lack the time to adapt to new, increasingly complex techniques for generating disinformation. This situation creates serious risks for public trust, can destabilize political processes, and undermine the foundations of information security both at the level of individual citizens and entire states. It is to counteract these complex threats that the development of a system for identifying sources of disinformation and propaganda, as well as their potential participants, is being initiated.

Comments, as a tool for spreading propaganda, can serve as a channel for promoting a certain ideological or political narrative. For example, bots or coordinated accounts leave messages that repeat the same messages, and disinformation is placed in comments under the guise of "the opinions of ordinary people". Therefore, it is very important to develop tools to identify potential participants in the spread of propaganda and disinformation, as well as the source itself.

Analysis of recent research and publications. Given the growth of information warfare in social networks, especially in the context of military aggression and hybrid threats, there is a need for automated solutions for monitoring and detecting propaganda. Comments in the online space play a dual role in the processes of information influence: on the one hand,

they can be a channel for the spread of propaganda through bot activity and manipulative messages; on the other, a source for studying the mechanisms of information influence and a possible tool for countering disinformation. For the classification of comments and reviews in the Ukrainian language, such language models as BERT, DistilBERT, RoBERTa, XLM-RoBERTa and Ukr-RoBERTa are used. The authors chose the RoBERTa transformer model for research and classification.

RoBERTa is an optimized BERT model retrained with an improved training methodology, more data, and hardware resources, as proposed in [1]. It improves BERT by carefully and intelligently optimizing the training hyperparameters for BERT. RoBERTa uses the same architecture as BERT. However, unlike BERT, it only trains the generation of the missing token during pretraining (BERT was also pretrained to predict the next sentence). That is, RoBERTa without the concept of predicting the next sentence is similar to BERT and uses dynamic masking.

The scientific paper [2] presents the use of different algorithms for the multi-class and cross-lingual task of fake news detection using the RoBERTa model. The results of the macro F1-score evaluation using the pre-trained RoBERTa model are 28.60% for the monolingual task in English.

Scientists [3] conducted a study of the problem of automatic fake news detection in Urdu. The article presents the use of various word embedding models, such as RoBERTa, ALBERT, XLM-RoBERTa, and Multilingual BERT. Model RoBERTa is trained on Urdu news data from Pakistani newspapers and gives the results of accuracy 92%. It is built on BERT, trained with larger mini-batches and learning rates.

The study [4] describes the fine-tuning of the BERT, DistilBERT, XLM-RoBERTa and Ukr-RoBERTa models for sentiment analysis of Ukrainian language reviews, since transformer models demonstrate better understanding of the context and show high efficiency in solving natural language processing tasks. The dataset for the study consists of approximately 11,000 user comments in Ukrainian on various topics. The authors proposed to classify text data into two classes: positive and negative. After pre-processing the text, the dataset was divided into training and test samples in a ratio of 80:20. The effectiveness of the classification models was evaluated using metrics such as accuracy, recall, precision, and F1-score. According to the research results, the XLM-RoBERTa model achieved the highest accuracy of 91.32%. However, considering the time required to train the model and all classification metrics, Ukr-RoBERTa is a more optimal choice.

The study [5] proposes a framework that allows you to quickly create corpora for classifying Ukrainian-language news with minimal data annotation efforts. The results of testing on this set showed that the ukr-RoBERTa, ukr-ELECTRA, and XLM-R large models demonstrate the highest accuracy rates. At the same time, XLM-R large and ukr-ELECTRA perform better in processing longer texts, while ukr-RoBERTa shows an advantage in classifying short text fragments.

The scientific paper [6] presents EMOBENCH-UA, the first annotated corpus for emotion recognition in Ukrainian-language texts. The annotation scheme was adapted from English-language research in this field [7], taking into account instructions and cultural features. The data was collected through crowdsourcing on the Toloka.ai platform, which made it possible to ensure high-quality labelling. During the research, various approaches to analysing this corpus were evaluated – from basic linguistic models and translated synthetic sets to modern large language models (LLM). The results of the experiments demonstrate the complexity of the task of emotional classification for languages with limited resources, in particular Ukrainian, and indicate the need for further development of models and training materials focused specifically on the Ukrainian language context.

The article [8] addresses the problems of sentiment analysis in Ukrainian social networks, where users frequently switch encodings between Russian and other languages. Authors present COSMUS (Code-Switched Multilingual Sentiment for Ukrainian Social media) – a corpus of 12,224 texts collected from Telegram channels, product review sites, and open datasets annotated with positive, negative, neutral, and mixed sentiment classes, as well as language tags (Ukrainian, Russian, with code-switching). Fine-tuning UkrRoBERTa using GPT-4o-based data augmentations provides a maximum accuracy of 73.6%, which exceeds the baseline levels of mBERT.

The scientific paper [9] presents LiBERTa Large – the first BERT Large model that was fully trained from scratch exclusively on the Ukrainian-language corpus. By using large-scale multilingual corpora with a significant proportion of Ukrainian texts, the model forms a solid foundation for solving natural language processing problems in Ukrainian. The results show that LiBERTa Large outperforms both existing multilingual and monolingual models pre-trained in Ukrainian, and demonstrates performance comparable to or better than models based on knowledge transfer from English.

The authors [10] propose a conceptual model of the information warfare system, identify its weaknesses, and suggest an improvement mechanism, in particular through the creation and dissemination of content on social media, expanding audience coverage on WhatsApp, and utilizing IT, advanced technologies, and AI for faster threat detection. The proposed approach aims to reduce the vulnerability of state institutions and society to disinformation and propaganda, increase the responsiveness of countermeasures, and improve the effectiveness of risk assessment in the sphere of national security.

The article [11] describes a method for detecting sources of disinformation based on ensemble machine learning models. The authors used two types of text embeddings and corresponding classification models - linear and logistic regression. At the final stage, an ensemble of models was applied, which allowed combining their predictive capabilities and increasing the accuracy from 71% to 78%.

Based on the analysis of scientific papers, the authors selected the RoBERTa language model for the study. To test the model, a dataset of comments was manually collected, which will be used for training and classification.

Task statement. The purpose of the research is to create a system to combat information aggression, disinformation, fakes, and propaganda in social networks, in particular in TikTok, using modern methods of natural language processing and artificial intelligence. Of great importance in this is the identification of potential participants in the process, as well as the source of the spread of fakes and propaganda. To solve this problem, it is necessary to: analyze methods and means of identifying sources of disinformation and propaganda; analyze the collected dataset of comments using deep learning and clustering models (such as BERT, RoBERTa), which will allow dividing comments by semantic features into propaganda and neutral ones; develop a system that automatically receives comments from videos in TikTok as a source, processes them and provides the user with information about the probable presence of propaganda.

Presentation of the Main Material. A dataset of comments was manually collected for training and testing the system. Comments were selected from videos containing trigger tags, such as #ukraine, #zelensky, #crimea, etc. Since the bot specializes in detecting russian propaganda, those comments that promote russian narratives, such as denial of Ukraine's independence and sovereignty, denial of the legitimacy of the Ukrainian government, justification of aggression, cruel treatment of the Armed Forces of Ukraine and Ukrainians, etc., were marked as propaganda. Thus, about 700 comments in Ukrainian and 1,300 comments in russian were collected and labeled for the classification model. More than 6,000

and 10,000 comments in Ukrainian and Russian, respectively, were collected for the clustering model.

The data sets have the following form (see Table 1 and Table 2).

If there is propaganda in the comment, the value of the field "Propaganda" is equal to 1, otherwise, it is 0.

Table 1 – Description of the dataset for the classification model

Column name	Data type	Description
Comment_ID	Integer	Comment identifier
Comment	String	Comment text
Propaganda	Bool	Presence or absence of propaganda features

Source: developed by the authors.

A custom scraper was used to collect comments. However, due to certain functional limitations of this scraper, the auxiliary tool TTCommentExporter was used. In addition, the generated dataset contained not only Ukrainian and russian, but also others. Therefore, a software module was created that automatically separates comments by language features. After that, an algorithm for pre-processing data from the dataset was developed.

Table 2 – Description of the dataset for the clustering model

Column name	Data type	Description
Comment_ID	Integer	Comment identifier
Comment	String	Comment text

Source: developed by the authors.

The data pre-processing algorithm contains the following steps:

Step 1. Reading the comment. The comment is sent by the user to the Telegram bot or downloaded from an Excel file (during the training stage).

Step 2. Determining the language of the comment. Using the langdetect library, it is determined whether the comment is written in Ukrainian or russian. The choice of the transformer model (UA_model or RU_model) depends on this.

Step 3. Tokenization. The AutoTokenizer from the corresponding Hugging Face model is used. The text is converted into a sequence of tokens taking into account:

- maximum size (truncation to 128 tokens);
- automatic padding;
- conversion to tensor (return_tensors='pt').

Step 4. Obtaining the embedding. From the AutoModel model (e.g. youscan/ukr-roberta-base), the CLS embedding (the first vector of the last layer) is extracted, which is considered a representation of the entire text.

Step 5. Extracting custom features.

Step 6. Scaling the features. Before merging, the custom features are normalized using StandardScaler() in order to avoid scale imbalance (CLS embedding has a different scale).

Step 7. Merging the features. The final feature is formed as a horizontal concatenation

Step 8. Feeding to the classifier / clusterer.

Step 9. Saving. Embeddings or merged vectors can be saved as .npy or .pkl for reuse; the trained model (KMeans, StandardScaler) is also saved using joblib.

The system implemented language models for comments in Ukrainian and russian:

- UA_model – for processing Ukrainian comments;
- RU_model – for processing russian comments.

The development of the models took place in two stages: experiments with classification with a teacher and the final transition to clustering without a teacher.

The main process of the system's operation includes the following stages:

- Model training. Training a machine learning model on data. This includes text vectorization, clustering, and testing the effectiveness of the model.
 - User interface creation. Developing a graphical interface where users can send links to video materials that need to be analyzed and displaying the results of the analysis.
 - Comment clustering. The process in which the system accepts a link provided by the user, receives comments, generates data sets, and determines which comments are propaganda and which are not. Includes vectorization, model application, and result calculation.
 - Result display. Visualization of analysis results, including the percentage of propaganda.
- Fig. 1 shows a UML activity diagram that describes the basic process of the system.

Classification model. For the classification model, data collection and preparation were carried out, namely, a small corpus of comments was manually collected and marked, where each text was marked as:

- 1 – propaganda;
- 0 – not propaganda.

The next stage was to calculate embeddings. For this, the comments were processed through youscan/ukr-roberta-base for the Ukrainian language, and for each comment, a representation was made in the form of a CLS vector. In addition, the following manual set of features was manually extracted for each comment:

- the presence of flags RU/UA;
- the proportion of capital letters;
- the number of character repetitions;
- the number of emojis;
- the length of the text, etc.

After that, the features were scaled using StandardScaler and combined with the CLS vector to form the final feature vector.

The next stage was training the classifier. For this, the RandomForestClassifier model was selected, which was trained on the collected vectors. Parameters were obtained via GridSearchCV with cross-validation (cv=5). The model was trained to determine whether the text contains propaganda.

Results for the classification model are next:

- recall for propaganda (1) – 100%;
- recall for non-propaganda (0) – only 5%;
- due to sample imbalance, the model tended to label almost everything as "propaganda".

In addition, an analysis of the criteria and parameters that can influence the identification of sources of disinformation and propaganda, as well as their potential participants, was conducted. Among the criteria that make it possible to identify sources of disinformation, one can single out certain propaganda narratives, as well as the language in which the comment is written (the vast majority of comments are written mostly in russian). Another criterion for identifying potential participants in propaganda is the fakeness of the account itself and, accordingly, all posts and comments of this participant. These criteria can be described as a set:

$$K = \{L, F_u, F_p\},$$

where L is the language, F_u is the fakeness of the account and F_p is the fakeness of posts.

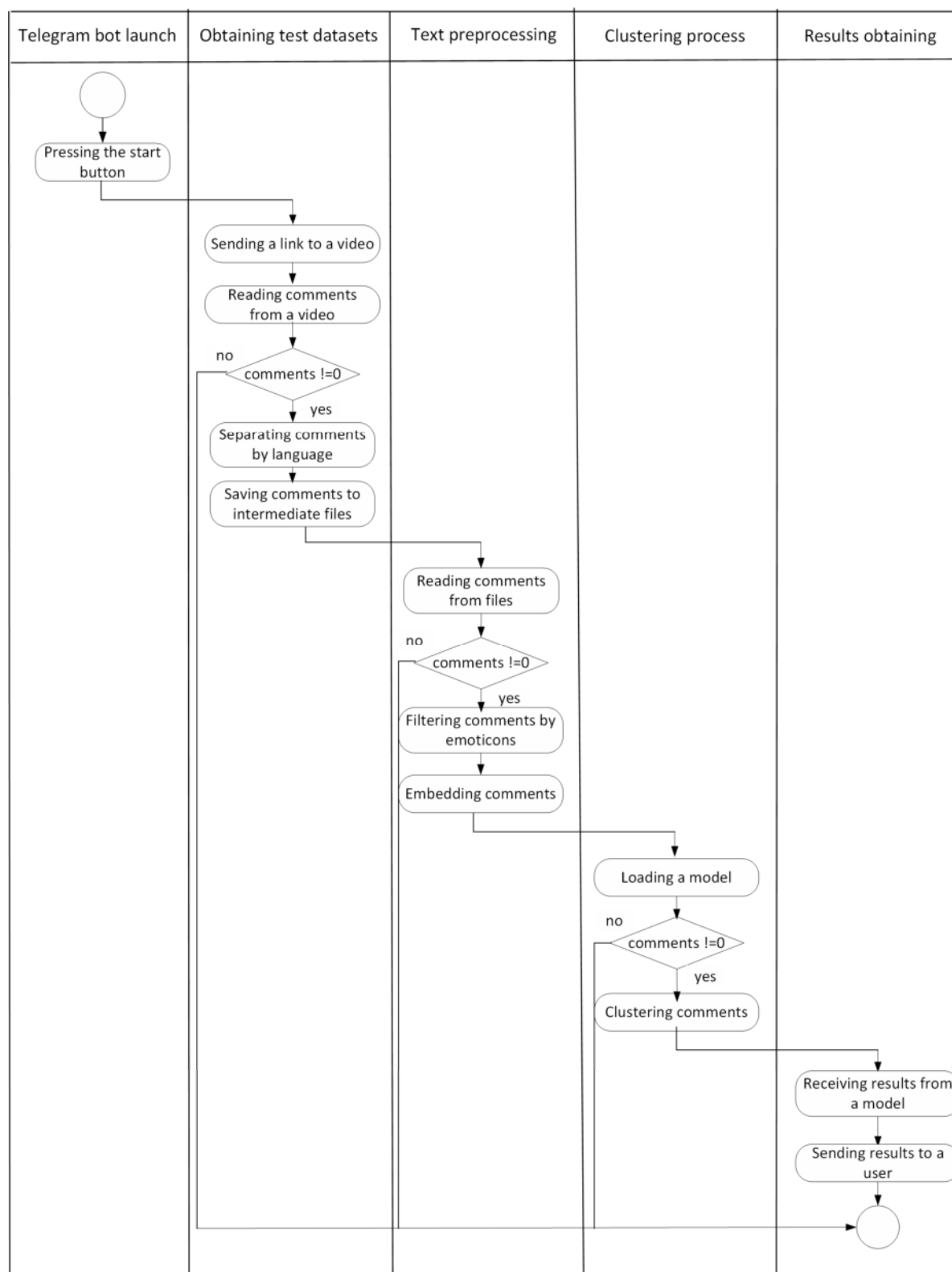


Figure 1 – UML diagram of the system

Source: developed by the authors

Clustering model. For the clustering model, the RoBERTa language model was used separately for the Ukrainian (UA_model) and russian (RU_model) language classes. During the collection of comments and their labeling, it was found that many comments are “gray”, that is, neutral or not unambiguously propaganda.

The same structure was implemented for the two models (UA_model and RU_model) using the corresponding RoBERTa language model, performing vectorization and feature extraction, as well as training the KMeans clusterer (2 clusters). The KMeans clustering algorithm divides all vectors into 2 groups without knowing the true labels. After clustering, the system analyzes the content of each cluster by the frequency of propaganda phrases. For each cluster, the following is calculated:

- the proportion of texts containing keywords;
- the proportion of propaganda emojis.

Accordingly, the cluster with the highest “propaganda score” is considered to correspond to the “Propaganda” class.

For new texts, the following occurs:

- vectorization (CLS + features);
- prediction of belonging to one of the clusters;
- determination of whether it is propaganda, based on comparison with the propaganda cluster.

Fig. 2 shows an example of using a Telegram bot to detect the presence of propaganda in comments.

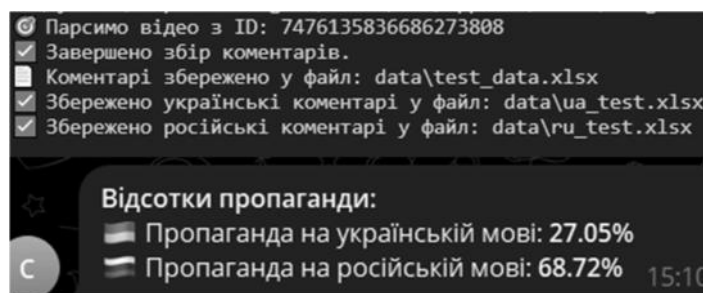


Figure 2 – The result of the clustering model

Source: developed by the authors.

In the process of research, a system was developed that allows for analyzing and classifying comments from videos on the TikTok network as propaganda or neutral. This will allow determining the source of the spread of propaganda, fakes, and disinformation.

Acknowledgements. The research was carried out with the grant support of the National Research Fund of Ukraine "Information system development for automatic detection of misinformation sources and inauthentic behavior of chat users", project registration number 33/0012 from 3/03/2025 (2023.04/0012).

Conclusions. As a result of the research, an effective system was developed for automatic detection of propaganda in comments to TikTok videos. The use of modern transformer models (RoBERTa), machine learning algorithms (classification and clustering), as well as the development of a full-fledged software package with a graphical interface, made it possible to implement a full cycle of data analysis, from collection to visualization of results. The structure of the system assumes a modular architecture: individual components are responsible for text vectorization, manual feature extraction, pre-processing, clustering, decision-making, and user interaction. Experiments showed high sensitivity of the classification model to detect propaganda messages, and accordingly, to track potential participants in disinformation and propaganda. However, due to the imbalance of the sample, limitations in accuracy were identified for neutral content. The clustering model allowed for better work with "gray zones" - ambiguous comments. Additionally, an analysis was conducted of parameters that allow us to identify not only propaganda, but also potential sources of its

distribution. These parameters include the use of characteristic propaganda narratives, the language of comments (mostly Russian), and signs of fake accounts - the same type of posts, low level of profile authenticity, etc. The created system can be integrated into platforms for monitoring the information space, which will significantly strengthen the capabilities of state and public institutions in countering hybrid threats in the information sphere.

List of References

1. Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. Roberta: A robustly optimized Bert pretraining approach. 2019. *arXiv preprint* arXiv:1907.11692. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11692>.
2. Arif M., Tonja A. L., Ameer I., Kolesnikova O., Gelbukh A., Sidorov G., Meque A. G. M. CIC at CheckThat! 2022: Multi-class and Cross-lingual Fake News Detection. *CEUR Workshop Proceedings* 2022. Pp. 434 – 443.
3. Kalraa S., Verma P., Sharma Y., Chauhan G. S. Ensembling of Various Transformer Based Models for the Fake News Detection Task in the Urdu Language. *Proceedings of the Forum for Information Retrieval Evaluation*. 2021.
4. Prytula M. Fine-tuning BERT, DistilBERT, XLM-RoBERTa, and Ukr-RoBERTa models for sentiment analysis of Ukrainian language reviews. *Artificial Intelligence*. 2024. № 29(2). Pp. 85–97. URL: <https://doi.org/10.15407/jai2024.02.085>.
5. Panchenko D., Tytarenko S., et al. Evaluation and Analysis of the NLP Model Zoo for Ukrainian Text Classification. In *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*. Springer. 2022. Pp. 109–123. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20834-8_6.
6. Dementieva D., Babakov N., Fraser A. EmoBench-UA: A Benchmark Dataset for Emotion Detection in Ukrainian. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.23297>.
7. Saif M. Mohammad. Ethics Sheet for Automatic Emotion Recognition and Sentiment Analysis. *Computational Linguistics*. 2022. № 48(2). Pp. 239–278. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.08256>.
8. Shynkarov Y., Solopova V., Schmitt V. Improving Sentiment Analysis for Ukrainian Social Media Code-Switching Data. In *Proceedings of UNLP-2025 Workshop (COSMUS benchmark)*. 2025.
9. Haltiuk M., Smywiński-Pohl A. LiBERTa: Advancing Ukrainian Language Modeling through Pre-training from Scratch. In *Proceedings of the Third Ukrainian Natural Language Processing Workshop*. 2024. Pp. 120–128.
10. Доренський О.П., Улічев О.С., Задорожний К.О., Коваленко А.С., Дреєва Г.М. Концептуальна модель системи інформаційного протидіяння координаційного центру з питань національної безпеки і оборони. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41). Ч. 2. С. 23-31. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.23-31](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.23-31).
11. Лозинська О.В., Марків О.О., Висоцька В.А. Метод виявлення джерел дезінформації на основі ансамблевих моделей машинного навчання. *Біоніка інтелекту*. 2025. № 1 (102). С. 11-19. URL: [https://doi.org/10.30837/bi.2025.1\(102\).02](https://doi.org/10.30837/bi.2025.1(102).02).

References

1. Liu, Y., Ott, M., Goyal, N., Du, J., Joshi, M., Chen, D., Levy, O., Lewis, M., Zettlemoyer, L., & Stoyanov, V. (2019). Roberta: A robustly optimized Bert pretraining approach. *arXiv preprint* arXiv:1907.11692. DOI: 10.48550/arXiv.1907.11692.
2. Arif, M., Tonja, A. L., Ameer, I., Kolesnikova, O., Gelbukh, A., Sidorov, G., & Meque, A. G. M. (2022). CIC at CheckThat! 2022: Multi-class and Cross-lingual Fake News Detection. *CEUR Workshop Proceedings* (pp. 434 – 443).
3. Kalraa, S., Verma, P., Sharma, Y., & Chauhan, G. S. (2021). Ensembling of Various Transformer Based Models for the Fake News Detection Task in the Urdu Language. *Proceedings of the Forum for Information Retrieval Evaluation*.
4. Prytula, M. (2024). Fine-tuning BERT, DistilBERT, XLM-RoBERTa, and Ukr-RoBERTa models for sentiment analysis of Ukrainian language reviews. *Artificial Intelligence*, 29(2), 85–97. <https://doi.org/10.15407/jai2024.02.085>
5. Panchenko, D., Tytarenko, S., et al. (2022). Evaluation and Analysis of the NLP Model Zoo for Ukrainian Text Classification. In *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications* (pp. 109–123). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20834-8_6.

6. Dementieva, D., Babakov, N., & Fraser, A. (2025, May 29). EmoBench-UA: A Benchmark Dataset for Emotion Detection in Ukrainian. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.23297>.
7. Saif M. Mohammad (2022). Ethics Sheet for Automatic Emotion Recognition and Sentiment Analysis. *Computational Linguistics*, 48(2), 239–278. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.08256>.
8. Shynkarov, Y., Solopova, V., & Schmitt, V. (2025). Improving Sentiment Analysis for Ukrainian Social Media Code-Switching Data. In *Proceedings of UNLP-2025 Workshop (COSMUS benchmark)*.
9. Haliuk, M., & Smywinski-Pohl, A. (2024). LiBERTa: Advancing Ukrainian Language Modeling through Pre-training from Scratch. In *Proceedings of the Third Ukrainian Natural Language Processing Workshop* (pp. 120–128).
10. Dorenskyi, O.P., Ulichev, O.S., Zadorozhnyi, K.O., Kovalenko, A.S., & Dreeva, G.M. (2024). The conceptual model of the information counteraction system of the coordination center for national security and defense issues. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41), Part 2, 23-31. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.23-31.
11. Lozynska, O.V., Markiv, O.O., & Vysotska, V.A. (2025). Method for detecting sources of disinformation based on ensemble machine learning models. *Bionics of Intelligence*, 1(102), 11–19. DOI: 10.30837/bi.2025.1(102).02.

О. В. Лозинська, О. О. Марків, В. А. Висоцька

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Виявлення джерел та учасників пропаганди в TikTok із використанням методів машинного навчання

У роботі представлено підхід до виявлення джерел дезінформації, фейків та пропаганди в соціальній мережі TikTok з використанням сучасних методів обробки природної мови (NLP) та штучного інтелекту. Основною метою дослідження є створення системи, здатної автоматично аналізувати коментарі до відео з пропагандистським вмістом, а також джерела їх поширення та потенційних учасників пропаганди.

У межах дослідження вручну зібрано корпус коментарів українською та російською мовами, які класифікувались як пропагандистські або нейтральні. На основі проведеного аналізу датасету, визначено певні критерії для виявлення джерел дезінформації та потенційних її учасників, зокрема через такі як використання російської мови, повторювані пропагандистські наративи, а також фейковість акаунтів. Розроблено два підходи до аналізу: класифікаційна модель на основі RandomForestClassifier та кластеризаційна модель з використанням алгоритму KMeans. Обидві моделі використовують трансформери RoBERTa для відповідних мов, а також додаткову вручну сформовану множину ознак коментарів. Побудовано Telegram-бот і графічний інтерфейс для зручного використання системи, що дозволяє отримувати коментарі з TikTok, класифікувати їх і надавати користувачеві результати аналізу. Запропонована система є актуальним інструментом для інформаційної безпеки та боротьби з пропагандою в цифровому середовищі.

У результаті дослідження було розроблено ефективну систему для автоматичного виявлення російської пропаганди в коментарях до відео в TikTok. Використання сучасних моделей трансформерів (RoBERTa), алгоритмів машинного навчання (класифікації та кластеризації), а також розробка повноцінного програмного комплексу з графічним інтерфейсом дозволили реалізувати повноцінний цикл аналізу даних - від збору до візуалізації результатів. Експерименти показали високу чутливість класифікаційної моделі до виявлення пропагандистських повідомлень, а відповідно і відслідковувати потенційних учасників дезінформацію та пропаганду. Однак через дисбаланс вибірки були виявлені обмеження у точності для нейтрального контенту. Кластеризаційна модель дозволила краще працювати з "сірими зонами" - неоднозначними коментарями. Додатково проведено аналіз параметрів, що дозволяють виявляти не лише пропаганду, а й потенційні джерела її поширення. До таких параметрів відносяться використання характерних пропагандистських наративів, мови коментарів (переважно російська), та ознаки фейковості акаунтів - однотипність дописів, низький рівень автентичності профілю тощо. Створена система може бути інтегрована в платформи моніторингу інформаційного простору, що значно посилить можливості державних та громадських інституцій у протидії гібридним загрозам в інформаційній сфері.

дезінформація, джерела пропаганди, датасет, модель RoBERTa, кластеризація, потенційні учасники пропаганди, множина критеріїв для виявлення учасників пропаганди

Одержано (Received) 11.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 629.3.021

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.99-105](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.99-105)

А. Р. Апаракін, канд. техн. наук, К. К. Щербина, доц., канд. техн. наук,

А. М. Кириченко, проф., д-р техн. наук, В. А. Годорожа

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: anton.aparakin@gmail.com*

Підвищення надійності кулько-гвинтового гідропідсилювача рульового управління із аксіальною структурою приводу

У статті проаналізовано конструктивні недоліки класичних кулько-гвинтових гідропідсилювачів, зокрема виникнення перекидального моменту на рейці-поршні, який прискорює знос деталей, знижує надійність і ККД рульового механізму. Запропоновано вдосконалену конструкцію зі зміщенням вісей поршня та гвинта до початкової площини рейкової передачі. Це дозволяє очікувати зменшення сил тертя, зносу вузлів та підвищення ККД на 5,9%. Проведено аналітичне обґрунтування ефективності запропонованої конструкції. **надійність, конструкція, рульове управління, гідропідсилювач, автотранспорт**

Постановка проблеми. Кулько-гвинтові гідропідсилювачі отримали широке розповсюдження в автомобільній техніці. За допомогою механізмів вдалося значно підвищити комфорт та безпеку керуванням автотранспортними засобами (вантажними автомобілями, будівельною технікою, автобусами, тролейбусами), які мають значне навантаження на керовану вісь – від 2000 Н до 8000Н [1].

За період свого технічного розвитку, КГПП отримав «класичну» конструкцію, яка не зазнавала кардинальних змін аж із 80-х років ХХ сторіччя. Однак, відома конструкція має недоліки – механізм має недостатню надійність через наявність перекидального моменту на поршні, обумовленого тим, що початкова площина рейкової передачі не співпадає із лінією дії рівнодіючої гідравлічних сил, яка проходить через центр тиску, який розташовується на вісі поршня. Це призводить до підвищеного зносу як поршня, так і корпусу, а також знижує коефіцієнт корисної дії (ККД) рульового механізму.

Усунення цього недоліку конструкції та покращення функційних показників КГПП є важливою інженерною практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Станом на сьогодні, розвиток та вдосконалення КГПП йде шляхом інтеграції гідравліко-механічної частини агрегату із управляючою електронною системою. Такі електро-гідравлічні КГПП впроваджуються провідними виробниками, наприклад Bosch [2] та Nissan [3], а також їм присвячена значна частина актуальних наукових досліджень [4-7].

В свою чергу, дослідження вітчизняних науковців присвячуються, переважно, підвищенню ефективності конструкції рульових агрегатів та систем [8-10].

Перспективним варіантом вирішення піднятої у роботі проблеми може стати доопрацювання конструкції КГПП шляхом виконання пазів в зубцях рейкової передачі для розміщення в них гвинта-ротора. Це дасть також змогу розмістити вісі поршня та гвинта в початковій площині рейкової передачі [11].

Постановка завдання. Мета роботи – це створення конструкції КГПП рульового управління транспортного засобу, в якій нове виконання робочого поршня та зубчатого

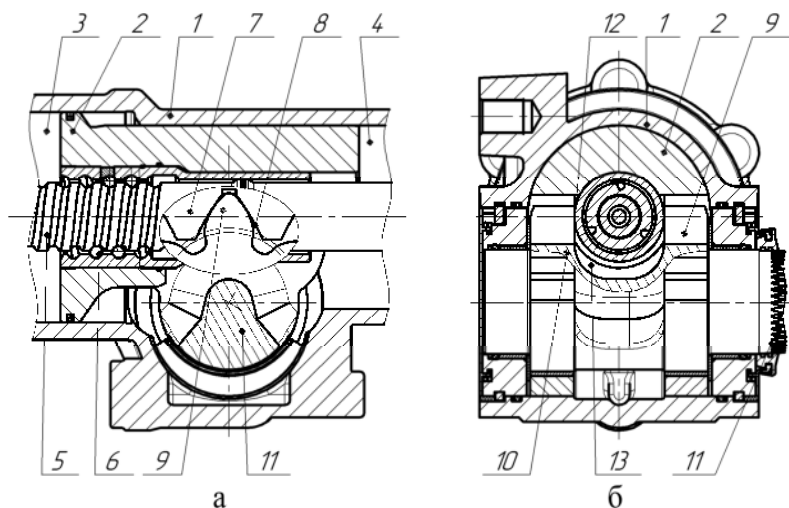
вала-сектора рульової сошки, дозволило б забезпечити підвищення надійності та ККД рульового механізму.

Дослідження в роботі ґрунтуються на положеннях теоретичної механіки, теорії опору матеріалів та теорії гідравліки та гідроприводу. Для досягнення поставленої мети розроблено програму досліджень, яка має такі етапи:

- розробка конструкції КГПП, позбавленої відомих недоліків, згідно мети;
- аналіз схеми навантаження поршня відомої конструкції;
- визначення рівнянь, які дозволять визначити ККД механізму з урахуванням всіх шкідливих сил опору, для обох порівнюваних варіантів;
- здійснити визначення втрат ККД від перекидального моменту на поршні.

Виклад основного матеріалу. В протиположному усталеному конструктивному виконанню КГПП, та з метою вирішення поставленої задачі дослідження, запропоновано конструктивне рішення, яке передбачає розташування вісей поршня та гвинта в початковій площині рейкової передачі, рис. 1.

Реалізація такого рішення можлива шляхом виконання в зубцях рейкової передачі пазів, в яких розташовується гвинт (із забезпеченням розташування вісей поршня та гвинта в початковій площині рейкової передачі). Поверхні пазів, що виконані в зубцях рейки та зубчастого сектора, еквідистантні поверхні гвинта.



а - повздовжній переріз; б - поперечний переріз;

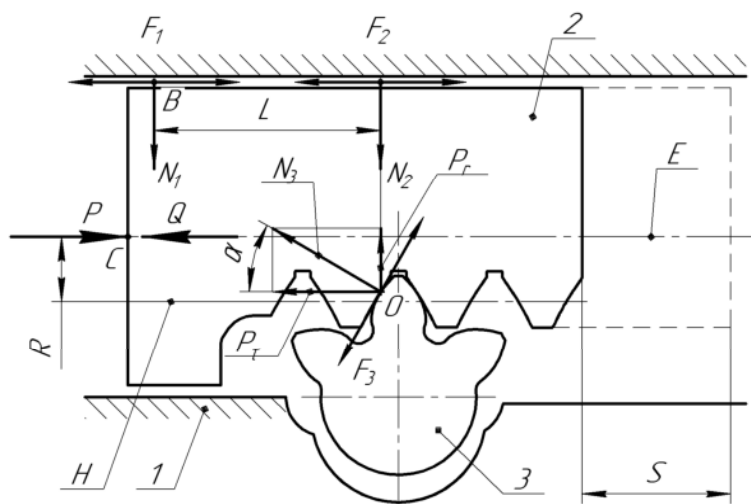
- 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – ліва порожнина; 4 – права порожнина; 5 – гвинт; 6 – кулько-гвинтова передача;
 7 – зубчаста рейка; 8 – зубець зубчастої рейки; 9 – зубці зубчастого сектора; 10 – зубчастий сектор;
 11 – вал рульової сошки; 12 – паз у зубцях зубчастої рейки; 13 – паз у зубцях зубчастого сектора.

Рисунок 1 – Конструкція КГПП

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Таке конструктивне виконання дозволить виключити перекидальний момент на поршні, оскільки лінія дії рівнодіючої гідравлічних сил, що проходить через центр тиску поршня, що співпадає з вісями поршня і гвинта (з початковою площиною рейкової передачі), що призведе до значного зменшення зносу корпусу та поршня.

Розглянемо та проаналізуємо схему навантаження поршня відомої [2] конструкції КГПП, рис. 2, для порівняння із запропонованою.



1 – картер; 2 – рейка-поршень; 3 – вал-сектор;

B – точка перекошу поршня; C – точка прикладення рівнодіючої гідравлічних сил до поршня (центр тиску);

E – вісь поршня (гвинта); H – початкова площина рейкової передачі; F_1 – сила тертя від перекошу поршня відносно корпусу; F_2 – сила тертя при ковзанні поршню відносно корпусу; F_3 – сила тертя в рейковій передачі;

L – відстань від точки контакту рейки з зубчастим сектором до лінії дії сили нормальної реакції опори N_1 ; N_1 – сила нормальної реакції від перекошу поршня відносно корпусу; N_2 – сила нормальної реакції опори при ковзанні поршню відносно корпусу; N_3 – рівнодіюча сила опору в рейковій передачі, вона ж сила нормальної реакції опори; O – точка контакту рейки із зубчастим сектором; P – рівнодіюча гідравлічних сил, які діють на поршень; P_r – радіальна сила в зачепленні; P_t – тангенціальна сила в зачепленні; R – відстань від центра тиску до початкової площини рейкової передачі; Q – сила опору (без врахування сил тертя);

S – величина ходу поршня; α – кут зачеплення рейкової передачі, $\alpha = 25^\circ$.

Рисунок 2 – Схема навантаження поршня в відомій конструкції

Джерело: розроблено авторами на підставі [2]

Так як у механізмі що розглядається швидкість переміщення поршня відносно корпусу незначна, то приймаємо [12]:

$$\mu = \mu^c \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт тертя спокою;

μ^c – коефіцієнт тертя ковзання.

У нашому випадку зовнішньою силою, під дією якої поршень переміщується відносно корпусу, являється гідравлічний тиск рідини на поршень. Так як рідина у порожнини корпусу подається під тиском, то точка прикладення рівнодіючої P гідравлічних сил (центр тиску C), співпадає з віссю поршня.

Умова рівноваги поршня відносно точки O :

$$\begin{aligned} \sum M(O) &= 0; \\ PR + N_1 L &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

При роботі, у рульовому механізмі виникає шкідливий опір від сил тертя, який обумовлений:

- наявністю перекидального моменту – сила F_1 ;
- ковзанням поршню відносно корпусу – сила F_2 ;
- наявністю зубчастого зачеплення – сила F_3 .

Ці шкідливі опори призводять до зниження ККД механізму, підвищують знос від тертя поверхонь корпусу та поршня.

Проаналізуємо формулу (2).

Параметр P являється розрахунковим, і зміні не підлягає. Зменшення шкідливого опору шляхом зменшення сил тертя F_2 та F_3 не є можливим. Зменшення сили F_1 можна досягти, зменшивши відстань R . У випадку, коли $R = 0$, тобто центр тиску C , отже і вісі поршня та гвинта, лежать у початковій площині H рейкової передачі, перекидальний момент дорівнює нулю, тобто F_1 також дорівнює нулю, що дозволяє зменшити шкідливий опір.

ККД механізму визначається по формулі [12]:

$$\eta = \frac{A_k}{A_e} = \frac{A_e - A_{ш}}{A_e} = 1 - \frac{A_{ш}}{A_e}, \quad (3)$$

де η – ККД механізму;

A_k – корисна робота;

A_e – витрачена робота;

$A_{ш}$ – шкідлива робота.

Як вказувалось вище, шкідливі сили опору обумовлені силами тертя F_1 , F_2 та F_3 , які в свою чергу визначаються через реакції опор N_1 , N_2 та N_3 .

З урахуванням формули (2):

$$F_1 = \mu \cdot P \cdot \frac{R}{L}. \quad (4)$$

Сила N_2 являється реакцією опори від радіальної сили, яка діє в зачепленні, отже:

$$F_2 = \mu \cdot P \cdot \tan \alpha. \quad (5)$$

Сила N_3 розташована вздовж лінії зачеплення рейкової передачі та являється рівнодіючою сил P_r та P_τ , тому, отже:

$$F_3 = \mu \cdot P \cdot \frac{1}{\cos \alpha}. \quad (6)$$

Робота сил тертя (шкідливих сил опору) [12], з урахуванням формул (4), (5), (6):

$$A_{ш} = (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) \cdot S = \mu \cdot P \cdot S \cdot \left(\frac{R}{L} + \tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha} \right), \quad (7)$$

де S – переміщення, яке тіло здійснює.

Тоді витрачена робота A_e дорівнює:

$$A_e = \mu \cdot P \cdot S \cdot \left(\frac{R}{L} + \tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha} \right) + P \cdot S = P \cdot S \cdot \left(\mu \cdot \left(\frac{R}{L} + \tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha} \right) + 1 \right). \quad (8)$$

Підставляємо значення $A_{ш}$ та A_e в формулу (3) для визначення ККД, та після спрощень отримуємо:

$$\eta = 1 - \frac{\mu \cdot \left(\frac{R}{L} + \tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha} \right)}{\mu \cdot \left(\frac{R}{L} + \tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha} \right) + 1}. \quad (9)$$

Данна формула (9) дозволяє визначити ККД з урахуванням всіх шкідливих сил опору.

При співпадінні центру тиску C з початковою площиною H рейкової передачі, тобто при $R = 0$, що має місце у пропонованій конструкції КГГП, формула (9) буде мати вигляд:

$$\eta = 1 - \frac{\mu \cdot (\tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha})}{\mu \cdot (\tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha}) + 1}. \quad (10)$$

З виразу (10) видно, що в рульовому механізмі, в якому відсутній перекидальний момент, тобто при $R = 0$, ККД механізму зміниться.

Для порівняльної оцінки значень ККД у рульового механізму з наявністю перекидального моменту та без нього, приймемо ряд припущень:

1. ККД рульового механізму без перекидального моменту на поршні визначається з виразу:

$$\eta_1 = \eta_n \cdot \eta_u, \quad (11)$$

де η_n – ККД рейкової передачі; $\eta_n = 0,96$ [13];

η_u – ККД гідроциліндру; $\eta_u = 0,93$ [14].

Таким чином:

$$\eta_1 = 0,96 \cdot 0,93 = 0,893. \quad (12)$$

Підставивши значення η_1 в формулу (10), визначимо середнє значення коефіцієнта тертя μ рульового механізму:

$$\mu = \frac{1}{\frac{1}{1 - \eta_1} - (\tan \alpha + \frac{1}{\cos \alpha})}. \quad (13)$$

2. Приймаємо наступні значення параметрів у виразах (9) та (10): $R = 1,0$; $L = 1,0$; $\mu = 0,08$ – усереднений коефіцієнт тертя рульового механізму, визначений по формулі (13).

З урахуванням прийнятих припущень по п. 1 та п. 2, визначимо ККД рульового механізму з наявним перекидальним моментом на поршні, по формулі (9):

$$\eta_2 = 1 - \frac{0,08 \cdot (1 + 0,466 + 1,04)}{0,08 \cdot (1 + 0,466 + 1,04) + 1} = 0,834. \quad (14)$$

Таким чином, втрати ККД від перекидального моменту на поршні складають:

$$\Delta \eta = \eta_1 - \eta_2 = 0,893 - 0,834 = 0,059, \quad (15)$$

або 5,9%.

Висновки. Запропонована конструкція КГГП, у якій осі поршня та гвинта суміщені з початковою площиною рейкової передачі, дозволить усунути перекидальний момент на поршні, який є основним джерелом підвищеного зносу та зниження ефективності відомих конструкцій.

Проведені аналітичні розрахунки показали, що виключення перекидального моменту приводить до істотного зменшення сил тертя між поршнем і картером, а також у деталях рейкового зачеплення, що забезпечує зниження зношування вузлів та підвищення надійності рульового механізму. Отримані залежності для визначення ККД підтвердили, що втрати від перекидального моменту складають 5,9%, тобто саме на цю величину має зрости ККД у запропонованій конструкції.

Важливою особливістю запропонованої конструкції КГГП є виконання пазів у зубцях рейкової передачі еквідистантно поверхні гвинта, що дозволяє зберегти правильну геометрію зачеплення, знизити контактні напруження та підвищити довговічність механізму без ускладнення технології виготовлення.

Запропоноване конструктивне рішення забезпечує підвищення надійності та енергоефективності гідропідсилювача і може бути рекомендоване для впровадження у сучасні рульові системи автотранспортних засобів без істотного ускладнення виготовлення.

Список літератури

1. Аврун Г. А., Кириченко І. Г., Самородов В. Б. Гідравлічне обладнання будівельних та дорожніх машин : підруч. для студентів ВНЗ. Харків : ХНАДУ, 2016. 438с.
2. Bosch Servotwin electro-hydraulic steering system : веб сайт. URL: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/steering/servotwin/> (дата звернення 28.05.2025).
3. Nissan – Electro-Hydraulic Power Steering System : веб сайт. URL: <https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/EHPSS/> (дата звернення 28.05.2025).
4. Tang B., Jiang H., Gong X., Optimal design of variable assist characteristics of electronically controlled hydraulic power steering system based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Vehicle Design*. 2017. Vol. 73 (1/2/3). P. 189-207. DOI: 10.1504/IJVD.2017.082596.
5. Barua R. Conventional power steering system of vehicle and continuous improvement. *Proceedings of the 5-th International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, 22-24 December 2022. Khulna, Bangladesh, RUET, 2022. P. 6.
6. Zhao W. Electro Hydraulic Hybrid Power Steering System. *Vehicle Steer-by-Wire System and Chassis Integration*. Springer, Singapore. 2023. P. 165-225. DOI: 10.1007/978-981-19-4250-1_4.
7. Vacca Andrea, Franzoni Germano. Power Steering and Hydraulic Systems with Priority Function. *Hydraulic Fluid Power: Fundamentals, Applications, and Circuit Design*. Wiley, 2001. p.519-538. DOI: 10.1002/9781119569145.ch22.
8. Аналіз динаміки об'ємного гідропривода рульового керування самохідного тракторного шасі / Г. А. Аврун та ін. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ", Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*. 2023. Вип.1. С. 35-42. DOI: 10.20998/2411-3441.2023.1.06.
9. Синтез схем навантаження силових елементів кульково-гвинтового гідропідсилювача з аксіальною структурою приводу / Апаракін А.Р., Єрьомін П.М., Мажара В.А. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки»*. 2024. Вип. №9(40). Ч. 2. С.23-31. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.23-31.
10. Кульково-гвинтовий гідропідсилювач : пат. 154818 Україна : МПК В61D5/06. № у 2023 02700 ; заявл. 02.06.2023 ; опубл. 20.12.2023, Бюл. №51.
11. Апаракін А.Р. Спосіб підвищення надійності кульково-гвинтового гідропідсилювача руля. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: зб. матеріалів XV міжнар. наук.-практ. конф., 22-23 тра. 2025 р. Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2025. Т. 1. С. 219.
12. Теоретична механіка: навч. посіб. / Штанько П. К. та ін. ; за ред. П. К. Штанька. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 464 с.
13. Калязін, Ю. В. Технічна механіка : навч.-метод. посіб. до самост. роб. Полтава : ПП «Астра», 2021. 204 с.
14. Колісниченко Е. В., Мандрика А. С., Панченко В. О. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : конспект лекцій для студ. спец. 131 "Прикладна механіка" та 133 "Галузеве машинобудування" всіх форм навчання. Суми : СумДУ, 2021. 176 с.

References

1. Avrunin, H. A., Kyrychenko, I. H., & Samorodov, V. B. (2016). *Hidravlichne obladnannia budivelnnykh ta dorozhnykh mashyn* [Hydraulic equipment of construction and road machines]. Kharkiv: KHNAHU. [in Ukrainian].
2. Bosch Mobility. (n.d.). *Servotwin electro-hydraulic steering system*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/steering/servotwin/>.
3. Nissan Global. (n.d.). *Electro-Hydraulic Power Steering System*. Retrieved May 28, 2025, from <https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/EHPSS/>.
4. Tang, B., Jiang, H., & Gong, X. (2017). Optimal design of variable assist characteristics of electronically controlled hydraulic power steering system based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Vehicle Design*, 73(1/2/3), 189–207. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2017.082596>.
5. Barua, R. (2022). Conventional power steering system of vehicle and continuous improvement. *Proceedings of the 5th International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering* (p. 6). Khulna, Bangladesh: RUET.
6. Zhao, W. (2023). Electro hydraulic hybrid power steering system. *Vehicle Steer-by-Wire System and Chassis Integration* (pp. 165-225). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4250-1_4.

7. Vacca, A., & Franzoni, G. (2001). Power steering and hydraulic systems with priority function. *Hydraulic Fluid Power: Fundamentals, Applications, and Circuit Design* (pp. 519–538). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119569145.ch22>.
8. Avrunin, H. A., et al. (2023). Analiz dynamiky obiemnoho hidropryvoda rulovoho keruvannia samokhidnoho traktornoho shasi [Analysis of volumetric hydraulic drive dynamics of self-propelled tractor chassis steering]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty, (1)*, 35–42. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2023.1.06>.
9. Aparakin, A. R., Yeromin, P. M., & Mazhara, V. A. (2024). Syntez skhem navantazhennia sylovykh elementiv kulko-hvyntovoho hidropidsyliuvacha z aksialnoiu strukturou pryvodu [Synthesis of load circuits for power elements of ball-screw power steering with axial structure]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, (9)40(2)*, 23–31. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.23-31](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.23-31)
10. Pidhayetskyi, M.M., Aparakin, A.R., Lysenko, O.V., Shcherbyna, K.K. (2023). Kulko-hvyntovyy hidropidsyliuvach [Hydraulic ball-screw power steering] (Patent of Ukraine №154818). State intellectual property department of Ukraine.
11. Aparakin, A. R. (2025). Sposib pidvyshchennia nadiinosti kulko-hvyntovoho hidropidsyliuvacha rulya [Method to improve reliability of ball-screw power steering system]. In *XV International Scientific and Practical Conference "Complex Quality Assurance of Technological Processes and Systems"* (Vol. 1, p. 219). Chernihiv: NU "Chernihivska Politekhnika". [in Ukrainian].
12. Shtanko, P. K., et al. (Eds.). (2021). *Teoretychna mekhanika* [Theoretical mechanics]. Zaporizhzhia: NU "Zaporizka politekhnik". [in Ukrainian].
13. Kaliazin, Yu. V. (2021). *Tekhnichna mekhanika: Navchalno-metodychnyi posibnyk do samostiinoi roboty* [Technical mechanics: A study-methodical manual]. Poltava: PP "Astraya". [in Ukrainian].
14. Kolishnichenko, E. V., Mandryka, A. S., & Panchenko, V. O. (2021). *Hidravlika, hidro- ta pnevmopryvody: Konspekt lektsii* [Hydraulics, hydro- and pneumatic drives: Lecture notes]. Sumy: SumDU. [in Ukrainian].

Anton Aparakin, PhD tech. sci., **Kyryl Shcherbyna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Andriy Kyrychenko, Prof., Doctor tech. sci., **Viktor Hodorozha**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Reliability of the Ball-Screw Hydraulic Power Steering with an Axial Drive Structure

The purpose of this article is to improve the performance and reliability of ball-screw hydraulic power steering systems (BSHPS), which are widely used in heavy vehicles, buses, and construction machinery. Despite decades of operational success, classical designs of BSHPS have remained largely unchanged since the 1980s and still exhibit technical drawbacks. The main problem addressed is the occurrence of a tipping moment on the piston, caused by the misalignment between the rack transmission plane and the line of action of the hydraulic force resultant. This misalignment leads to excessive wear and a reduction in the efficiency of the steering mechanism. The aim of this study is to develop a new BSHPS design in which the piston and screw axes are aligned to eliminate this drawback and increase the system's efficiency.

The research is based on the principles of theoretical mechanics, materials resistance theory, and hydraulic drive theory. A comprehensive program was developed, including the analysis of load distribution in conventional BSHPS designs, mathematical modeling of efficiency with respect to all frictional resistance forces, and a comparative evaluation of mechanical efficiency losses due to the tipping moment. The proposed design introduces modifications to the gear teeth of the rack and sector, allowing for the installation of the screw axis within the initial plane of the rack transmission. This structural improvement eliminates the misalignment of the piston and screw, thereby reducing parasitic friction forces. Analytical derivations confirmed that this design results in decreased sliding friction, minimized wear, and improved energy transmission efficiency. The load diagrams and derived equations support a quantitative assessment of performance gains over conventional systems.

The key outcome of the research is the elimination of the tipping moment, which reduces the wear of piston and housing surfaces and increases the efficiency of the steering mechanism by 5.9%. This is achieved through the axial alignment of the piston and screw within the rack transmission plane. Furthermore, the design ensures lower friction losses and higher durability. The proposed groove geometry in the rack and sector gears minimizes the contact area and ensures reduced contact stress. These improvements collectively contribute to increased operational reliability and longer service life of the steering system.

reliability, design, steering control, hydraulic power steering, motor vehicle

Одержано (Received) 30.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 13.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 621.86

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.106-114](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.106-114)**І. Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **Р. М. Рогатинський** проф., д-р техн. наук,**А. Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук, **Т. А. Довбуш**, доц., канд. техн. наук,**А. Д. Довбуш**, **А. Г. Никитюк***Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: geckoivan1@ukr.net*

Синтез двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів

Дослідження присвячено проведенню структурно-схемного синтезу двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів. Такі транспортери знайшли широке використання у конвеєрних лініях для переміщення тари, тарних матеріалів, штучних вантажів тощо. Також вони використовуються при транспортуванні сипких і в'язких матеріалів, і відоме їх використання як змішувачів сипких та в'язких матеріалів. В результаті застосування морфологічного аналізу при генерації альтернатив двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з використанням структурно-схемного синтезу побудовано морфологічну таблицю окремих ознак конструктивних елементів цих систем і на її базі модель механічної системи «Двовальний гвинтовий конвеєр-змішувач». У результаті експертного аналізу при реалізації структурно-схемного синтезу двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів було обрано наступні основні морфологічні ознаки конструктивних елементів: привід (тип, вид руху, напрям руху, кількість, частота обертання); конструкція жолоба; гвинтові робочі органи (профіль спіралі, конструкція спіралі, діаметр спіралі, розташування спіралі); бункер (профіль, кількість, розташування, механізм завантаження); механізм розвантаження; опорно-руховий механізм. Це дало змогу отримати значну кількість ефективних варіантів технічних рішень двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з різними конструктивними ознаками.

морфологічний аналіз, структурно-схемний синтез, двовальний, гвинтовий, конвеєр, змішувач, змішування, шнек

Постановка проблеми. Двовальні гвинтові конвеєри часто використовуються для переміщення штучних вантажів, особливо в конвеєрних лініях у харчовій промисловості при наповненні різноманітної тари, але також використовуються і при транспортуванні сипких матеріалів. Проте, також відоме їх широке використання у якості змішувачів сипких та в'язких матеріалів як двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів (ДГКЗ). Тому при застосуванні ДГКЗ вони можуть виступати як транспортери-змішувачі з функціями перемішування і переміщення матеріалів, так і просто змішувачі. Для створення ефективних конструкцій ДГКЗ, що можуть забезпечувати високу однорідність змішування при значній продуктивності реалізації процесу та задовільній собівартості, доцільно провести генерування їх раціональних варіантів з подальшим теоретичним та експериментальним дослідженням і отриманням найпридатніших конструкцій для практичного використання. Застосування морфологічного аналізу при генерації альтернатив з використанням структурно-схемного синтезу якраз забезпечує отримання значної кількості конструктивних варіантів технічних рішень, а, відтак, у повній мірі може бути застосовано при генеруванні ДГКЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам створення та дослідження різноманітних типів гвинтових змішувачів присвячені багаточисельні доробки. Дослідники займалися як розробленням методик та їх застосуванням для отримання нових конструкцій гвинтових змішувачів [3, 5, 13, 17, 20, 23-30], так і теоретичними та експериментальним вивченням аспектів їх функціонування [3, 5, 13, 17, 20, 23-30]. Зокрема проблемам розроблення методик синтезу та їх реалізації для отримання нових конструкцій різноманітних гвинтових конструкцій присвячені роботи О. Ляшука [10, 11], В. Васильківа [1] та інших, а вивченням різноманітних аспектів їх функціонування, розрахунку та визначенню їх раціональних параметрів присвячені праці Б. Гевка [15],

М. Пилипця [15, 16, 18], О. Ляшука [24-30], В. Гудя [26-30], Д. Дмитріва [14, 21, 22], О. Гурика [2, 7] та багатьох інших. Однак, враховуючи той факт, що у різних галузях економіки (сільськогосподарському виробництві, фармації, будівництві, харчовій та переробній промисловості) існують відмінні вимоги до виконання змішувальних операцій, актуальність розроблення і дослідження нових конструкцій змішувачів, до яких і відносяться ДГКЗ, є важливою задачею.

Метою роботи є генерування конструкцій двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів шляхом проведення структурно-схемного синтезу з використанням морфологічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Гвинтові конвеєри з кількома паралельно розташованими привідними валами, оснащеними спіралями шнеків, використовуються не лише для переміщення штучних і кускових вантажів, та сипких і в'язких матеріалів, але і як змішувачі сипких та в'язких матеріалів у якості двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів [8, 10, 17, 20]. При цьому ДГКЗ використовуються як транспортери-змішувачі з функціями перемішування і переміщення матеріалів, так і просто гвинтові змішувачі. Для створення ДГКЗ було реалізовано генерування їх конструкцій при застосуванні вдосконаленого метод синтезу за допомогою морфологічного аналізу, який передбачає використання експертних оцінок та розбивки окремих ієрархічних груп на підгрупи за важливістю окремих ознак конструктивних елементів [6, 8-12]. У результаті експертної оцінки впливу різних факторів на виконання операції змішування ДГКЗ встановлено окремі ознаки конструктивних елементів цих механізмів, а також їх взаємозв'язки. Це забезпечило побудову морфологічної таблиці окремих ознак конструктивних елементів ДГКЗ (табл. 1), а на її базі, відповідно, модель механічної системи «Двовальний гвинтовий конвеєр-змішувач» (рис. 1). У результаті експертного аналізу при реалізації структурно-схемного синтезу ДГКЗ було обрано наступні основні морфологічні ознаки його конструктивних елементів: привід: тип, вид руху, напрям руху, кількість, частота обертання; конструкція жолоба; гвинтові робочі органи: профіль спіралі, конструкція спіралі, діаметр спіралі, розташування спіралі; бункер: профіль, кількість, розташування, механізм завантаження; механізм розвантаження; опорно-руховий механізм.

Загальна кількість генерованих варіантів ДГКЗ при використанні методу морфологічного аналізу з використання експертних оцінок та розбивки окремих ієрархічних груп на підгрупи за важливістю окремих ознак конструктивних елементів становитиме [6]:

$$N_{ДГКЗ} = \left| \begin{array}{c} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 3.1 \\ 3.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 5.1 \\ 5.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 6.1 \\ 6.2 \\ 6.3 \\ 6.4 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 7.1 \\ 7.2 \\ 7.3 \\ 7.4 \\ 7.5 \\ 7.6 \\ 7.7 \\ 7.8 \\ 7.9 \\ 7.10 \\ 7.11 \\ 7.12 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 8.1 \\ 8.2 \\ 8.3 \\ 8.4 \\ 8.5 \\ 8.6 \\ 8.7 \\ 8.8 \\ 8.9 \\ 8.10 \\ 8.11 \\ 8.12 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 9.1 \\ 9.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 10.1 \\ 10.2 \\ 10.3 \\ 10.4 \\ 10.5 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 11.1 \\ 11.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 12.1 \\ 12.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 13.1 \\ 13.2 \\ 13.3 \\ 13.4 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 14.1 \\ 14.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 15.1 \\ 15.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 16.1 \\ 16.2 \end{array} \right| = 63.$$

На рис. 2 зображені конструктивні рішення синтезованих ДГКЗ з гвинтовими робочими органами з ознакам 7.1 (суцільні спіралі), 8.1 (однин крок), 8.3 (однозахідні), 8.5 (однакової конструкції), 8.7 (з валом), 8.9 (циліндричні), 8.11 і 8.12 (ліво- і/або правосторонні), 9.1 (одного діаметра), 10.1...10.3 (з розміщенням витків один навпроти одного; розташування із зміщенням розміщення витків спіралей одних відносно інших; розташування з частковим розміщенням спіралей одна в одній).

Таблиця 1 - Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів

Привід					6. Конструкція жолоба
1. Тип	2. Вид руху	3. Напрямок руху	4. Кількість	5. Частота обертання приводів	
1.1. Електропривід 1.2. Гідропривід 1.3. З використанням альтернативних джерел енергії	2.1. З постійною швидкістю 2.2. Зі змінною швидкістю 2.3. З періодичними зупинками	3.1. Лівосторонній 3.2. Правосторонній	4.1. Один 4.2. Два	5.1. Однакова 5.2. Різна	6.1. U-подібна 6.2. Кругла 6.3. Конічна 6.4. Оригінальної форми
Гвинтові робочі органи					
7. Профіль спіралі		8. Конструкція спіралі	9. Діаметр спіралі	10. Розташування	
7.1. Суцільна 7.2. Стрічкова 7.3. Лопатева без регулювання величини просипання 7.4. Лопатева з регулюванням величини просипання 7.5. Гофрована 7.6. З розрізами, отворами чи вирізами 7.7. Вузькострічкова 7.8. Широкастрічкова 7.9. Еластична 7.10. Із загинами на зовнішній кромці спіралі 7.11. Пружинна (кругла) 7.12. Зі змінними додатковими елементами		8.1. З одним кроком 8.2. З різним кроком 8.3. Однозахідна 8.4. Багатозахідна 8.5. Однакова 8.6. Різна 8.7. З валом 8.8. Безвальна 8.9. Циліндрична 8.10. Конічна 8.11. Лівостороння 8.12. Правостороння	9.1. Одного діаметру 9.2. Різного діаметру	10.1. Паралельне з розміщенням витків один навпроти одного 10.2. Паралельне із зміщеним розміщенням витків спіралей одні відносно інших 10.3. Паралельне з частковим розміщенням спіралей одна в одній 10.4. Під кутом один до одної 10.5. Одна в одній	
Бункер					
11. Профіль	12. Кількість	13. Розташування		14. Механізм завантаження	
11.1. Суцільний 11.2. Секційний	12.1. Один 12.2. Два	13.1. Над одним шнеком 13.2. Посередині між шнеками 13.3. Над двома шнеками з однієї сторони 13.4. Над двома шнеками з різних сторін		14.1. З регульованим завантаженням 14.2. З нерегульованим завантаженням	
15. Механізм розвантаження			16. Опорно-руховий механізм		
15.1. Розвантажувальний отвір 15.2. Розвантажувальний патрубок			16.1. Без можливості зміни кута нахилу шнека 16.2. З можливістю зміни кута нахилу шнека		

Джерело: розроблено авторами

Конструктивні рішення ДГКЗ, зображені на рис. 2.в і рис. 2.г, досліджуються для отримання ефективних результатів продуктивності переміщення матеріалів та процесу змішування. На відміну від них конструктивні схеми, зображені на рис. 2.а і рис. 2.б, можуть мати значну ефективність саме для перемішування матеріалів, а також для їх розрихлення, позаяк тут використовуються лівосторонні та правосторонні шнеки, а також у конструктивному рішенні, зображеному на рис. 2.г, можна використовувати для їх обертання різні швидкісні режими.

На рис. 3 зображені конструктивні рішення синтезованих ДГКЗ з гвинтовими робочими органами з ознаками 7.1 (суцільні спіралі), 8.1 і 8.2 (з одним і з різним кроком), 8.3 (однозахідні), 8.5 (однакової конструкції), 8.7 (з валом), 8.9 (циліндричні), 8.11 і 8.12 (ліво- і/або правосторонні), 9.1 і 9.2 (одного та різного діаметра), 10.1 і 10.2 (з розміщенням витків один навпроти одного та паралельним розташуванням із

зміщеним розміщенням витків спіралей одних відносно інших). Зокрема на рис. 3.а...рис. 3.в зображені конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з гвинтовими робочими органами різного діаметра, а на рис. 3.а...рис. 3.в конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з гвинтовими робочими органами з різним кроком. Такі синтезовані альтернативні конструкції ДГКЗ на відміну від представлених на рис. 2 спрямовані на процес змішування, а не на транспортування, і можуть забезпечувати значну інтенсивність перемішування як сипких, так і в'язких сумішей. Проте у цих конструкціях неможливо використати ознаку 10.3 - розташування з частковим розміщенням спіралей одна в одній.

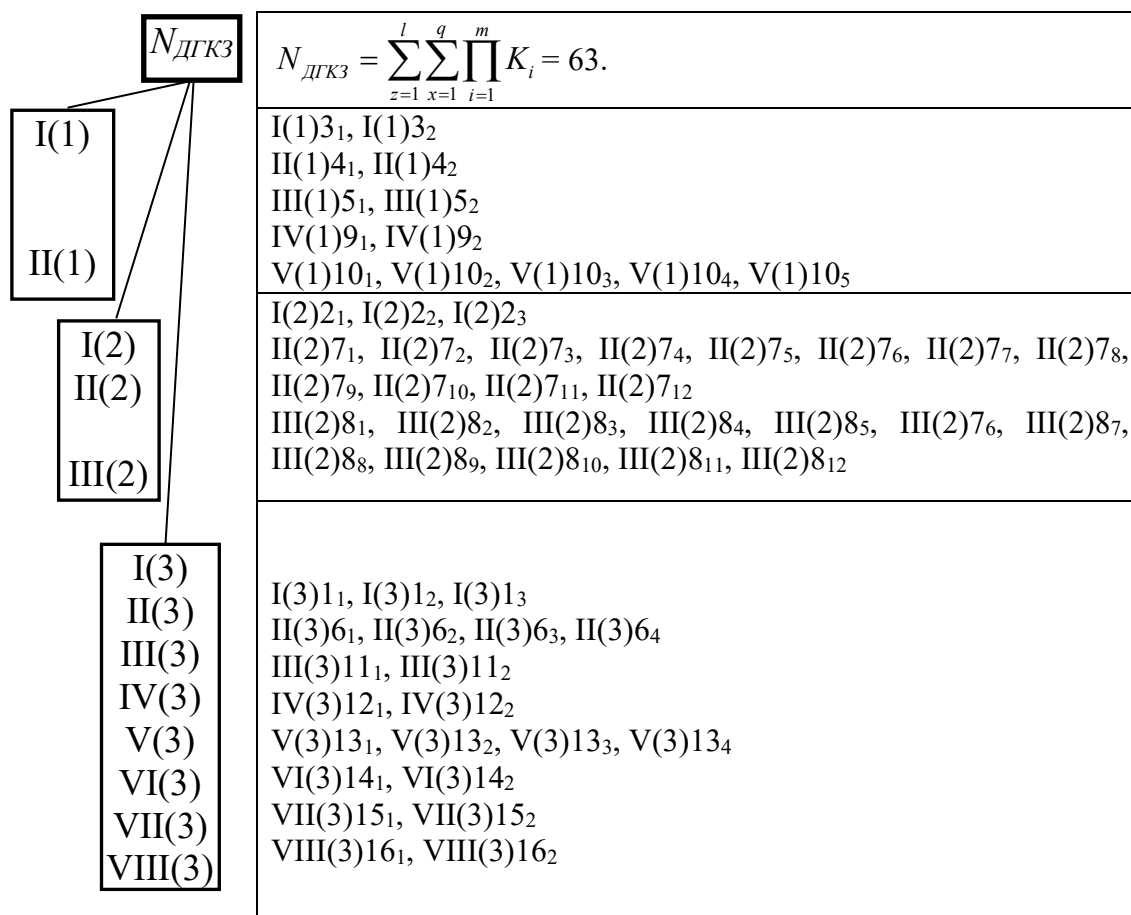


Рисунок 1 - Модель механічної системи «Двовальний гвинтовий конвеєр-змішувач»:

I - VIII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Джерело: розроблено авторами

Також було синтезовано цілий ряд ефективних гвинтових змішувачів з різними профілями спіралі (суцільна, стрічкова, лопатеві з і без регулювання величини просипання, гофрована, з розрізами, отворами чи вирізами, еластична, із змінними додатковими елементами тощо). Так на рис. 4 представлено конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з гвинтовими робочими органами з ознакам 7.2 (стрічкова спіраль) та 7.3 (лопатєва без регулювання величини просипання). Шнеки з такими профілями спіралей найбільш широко використовуються у гвинтових змішувачах.

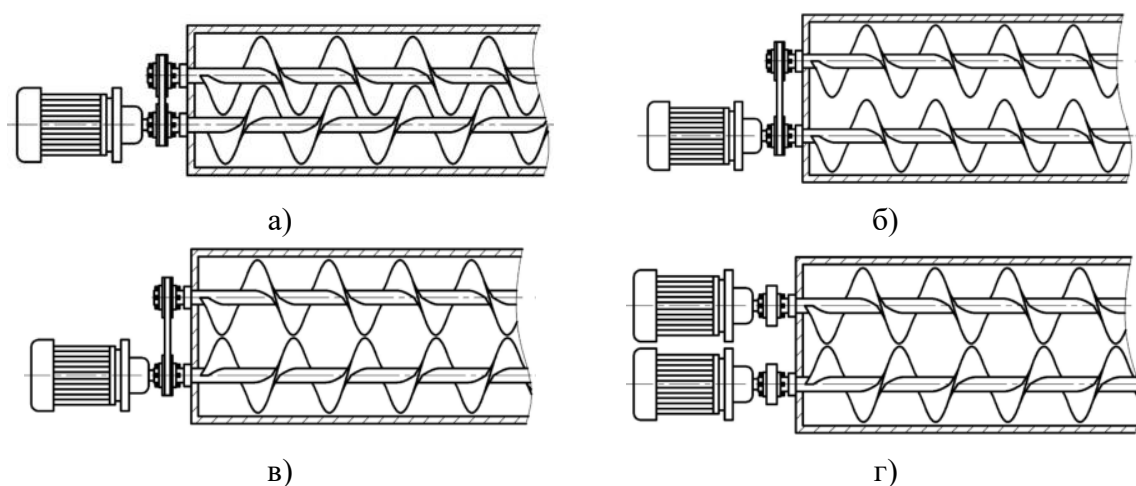


Рисунок 2 - Конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з ознаками конструктивних елементів з табл. 1:
 а) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 або 8.12, 9.1, 10.3; б) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 або 8.12, 9.1, 10.2; в) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.2, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1; г) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1

Джерело: розроблено авторами

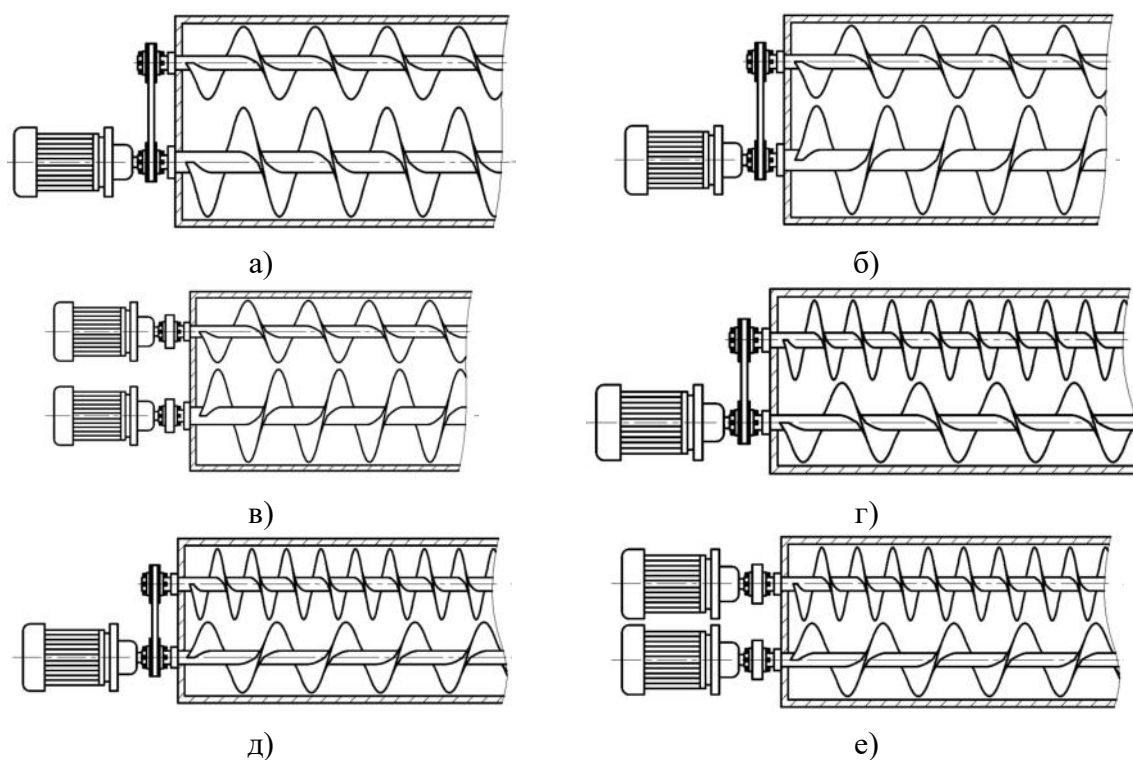


Рисунок 3 - Конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з ознаками конструктивних елементів з табл. 1:
 а) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 або 8.12, 9.2, 10.2; б) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.2, 10.1; в) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.2, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.2, 10.1; г) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 або 8.12, 9.1, 10.1; д) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.2, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1; е) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.2, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.1, 8.2, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1

Джерело: розроблено авторами

Окрім профілю спіралі важливим чинником впливу на процес змішування є її конструкція та розташування спіралей одна відносно одної. На рис. 5 представлено синтезовані варіанти з безвальними шнеками (рис. 5.а), конічними спіралями (рис. 5.б) (ознака 8 - конструкція спіралі), а також з розташуванням спіралей під кутом один до одної (рис. 5.в) та одна в одній (рис. 5.г) (ознака 10). Такі конструктивні схеми ДГКЗ також мають право на існування і в подальшому потребують значних теоретичних та експериментальних досліджень з метою встановлення їх ефективних конструктивно-технологічних характеристик.

Загалом синтезовані конструкції ДГКЗ дають можливість широкого дослідження гвинтових змішувальних систем із встановленням їх конструктивно-технологічних параметрів та вибором кращих конструкцій.

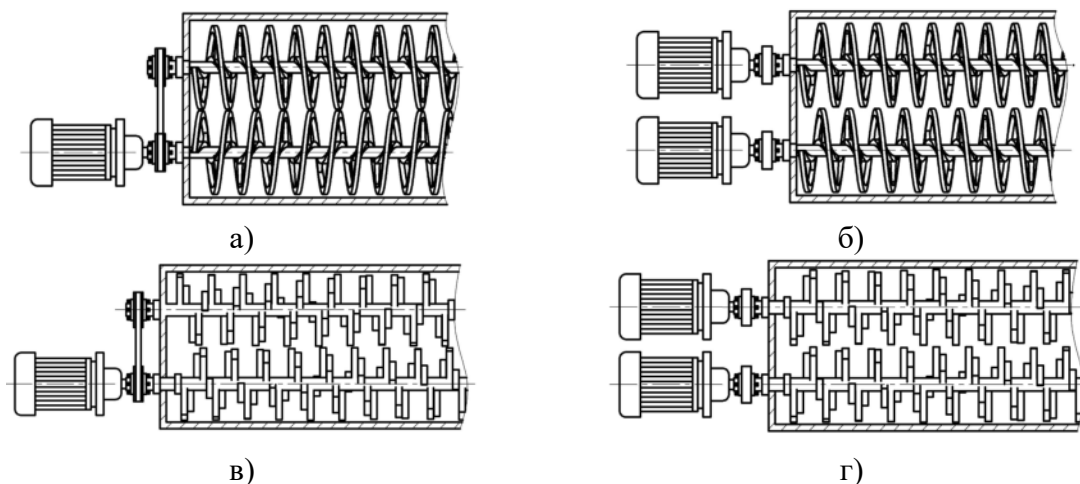


Рисунок 4 - Конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з ознаками конструктивних елементів з табл. 1:

а) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.2, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1; б) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.2, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.2, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 або 8.12, 9.1, 10.2; в) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 7.3, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1; г) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.2, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.3, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9, 8.11 або 8.12, 9.1, 10.2

Джерело: розроблено авторами

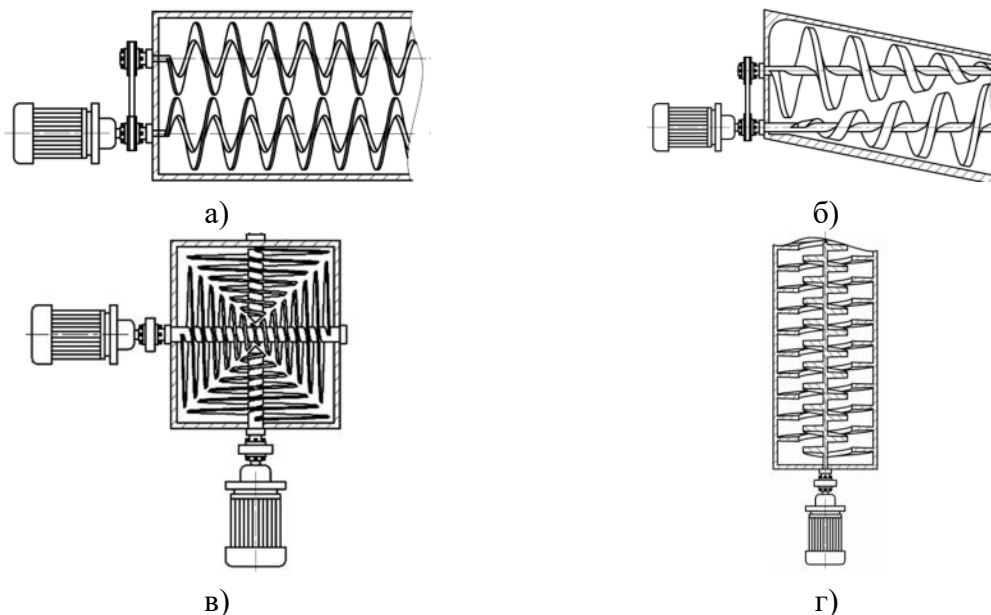


Рисунок 5 - Конструктивні схеми синтезованих ДГКЗ з ознаками конструктивних елементів з табл. 1:

а) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1 або 5.2, 6.1, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.8, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.1, 10.1; б) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1, 5.1 або 5.2, 6.4, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.10, 8.11 і 8.12, 9.2, 10.2; в) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.2, 5.1 або 5.2, 6.4, 7.1, 8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.10, 8.11 і 8.12, 9.2, 10.4; г) 1.1, 2.1...2.3, 3.1 або 3.2, 4.1 або 4.2, 5.1 або 5.2, 6.2, 7.1, 8.1, 8.3, 8.6, 8.9, 8.11 і 8.12, 9.2, 10.5

Джерело: розроблено авторами

Висновок. Проведено структурно-схемний синтез двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів. В результаті застосування морфологічного аналізу при генерації альтернатив побудовано морфологічну таблицю окремих ознак конструктивних елементів цих систем і модель механічної системи «Двовальний гвинтовий конвеєр-змішувач». Проведений експертний аналіз двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів дозволив обрати такі морфологічні ознаки конструктивних елементів: привід; конструкція жолоба; гвинтові робочі органи; бункер; механізм розвантаження; опорно-руховий механізм. Це дало змогу отримати значну кількість ефективних варіантів технічних рішень двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з різними конструктивними ознаками. Зокрема конструктивні схеми змішувачів з різними профілями, конструкціями спіралей та розташування спіралей одна відносно одної. Синтезовані конструкції двовальних гвинтових конвеєрів-змішувачів дають можливість широкого дослідження гвинтових змішувальних систем із встановленням їх конструктивно-технологічних параметрів та вибором раціональних конструкцій.

Список літератури

1. Васильків В. В., Гевко І. Б., Бабарика С. Ф. Синтез нових конструкцій гвинтових робочих органів машин внесення твердих органічних добрив. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2009. № 2. С. 170–173.
2. Гевко І. Б., Гурик О. Я. Визначення динамічних навантажень у гвинтовому змішувачі. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2002. № 442. С. 90–93.
3. Гевко І. Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. 2011. Т. 16, № 1. С. 69–77.
4. Гевко І., Любачівський Р., Дячун А. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2012. № 16. С. 237–246.
5. Гевко І. Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01. Луцьк, 1997. 18 с.
6. Гевко І. Б. Структурний синтез імпульсних запобіжних муфт і шнеків методом морфологічного аналізу. *Вісник ТНТУ*. 2012. № 3 (67). С. 121–134.
7. Гевко І. Б., Вітровий А. О., Гурик О. Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. Вип. 8. Луцьк, 2001. С. 72–82.
8. Гевко І. Б., Гудь В. З. Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 2 (33). С. 25–33.
9. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Любачівський Р. О. Структурний синтез гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями методом морфологічного аналізу. *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр.* Вип. 128/2012. Сер. Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь, 2012. С. 37–41.
10. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Клендій В. М. Синтез гвинтових конвеєрів з гнучкими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 112–121.
11. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Пік А. І., Марчук Н. М., Маруніч О. П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. Вип. 45. Луцьк, 2020. С. 35–44.
12. Гевко І., Довбуш Т., Цюнь О., Довбуш А., Станько А. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх досліджень. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. Вип. 47. Луцьк, 2021. С. 63–72.
13. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження : монографія / Гевко І. Б., Лешук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
14. Дмитрів Д. В., Гевко І. Б., Левенець В. Б. Надійність роботи шнеково-гвинтових змішувачів. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. Вип. 16. Луцьк, 2007. С. 62–74.
15. Механізми з гвинтовими пристроями : монографія / Б. М. Гевко, М. Г. Данильченко, Р. М. Рогатинський та ін. Львів : Світ, 1993. 208 с.
16. Пилипець М. І., Гевко І. Б., Вітровий А. О. Оптимізація робочого органу з пружним валом для гнучких гвинтових конвеєрів. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2000. № 412. С. 84–91.
17. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження : монографія. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
18. Пилипець М. І., Гевко І. Б., Вітровий А. О. Оптимізація робочого органу з секційними елементами для гнучких гвинтових конвеєрів. *Сільськогосподарські машини*. Вип. 5. Луцьк, 1999. С. 207–217.
19. Рогатинський Р. О., Гевко І. Б., Рогатинська Л. Р. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. *Вісник ТНТУ*. 2013. № 1 (69). С. 116–125.
20. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 280 с.

21. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В. Моделювання роботи малогабаритного лопатково-гвинтового змішувача. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. Вип. 6. Луцьк, 2000. С. 129–135.
22. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В., Гудь В. З., Дмитрів О. Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. Вип. 45. Луцьк, 2020. С. 84–93.
23. Hevko I. B., Dyachun A. Ye., Hud V. Z., Rohatynska L. R., Klendiy V. M. Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyor under the influence of pulse forces. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 45, № 1. P. 77–86.
24. Hevko I. B., Lyashuk O. L., Leshchuk R. Y., Rogatynska L. R., Melnychuk A. L. Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 48, № 1. P. 35–42.
25. Lyashuk O., Rohatynskyi R., Hevko I., Dmytriv O., Tson O., Tkachenko I., Sokol M., Leshchuk R., Kobelnik V. Investigation of bulk material transportation by screw conveyor with hinge-pan operating device. *Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipments – 2023*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Vol. 948. P. 169–182.
26. Hud V., Rogatynskyi R., Hevko I., Lyashuk O., Pic A., Huryk O. Research in resonant oscillations of the telescopic screw–granular media system caused by external periodic forces. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 60, № 1. P. 29–36.
27. Lyashuk O. L., Hevko I. B., Hud V. Z., Tkachenko I. G., Hevko O. V., Sokol M. O., Tson O. P., Kobelnik V. R., Shmatko D. Z., Stanko A. I. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw–fluid medium" system. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 68, № 3. P. 499–510.
28. Hud V., Hevko I., Lyashuk O., Hevko O., Sokil M., Shust I. Research of resonance vibrations of the system "Telescopic screw is a bulk medium" caused by torsional vibrations. *Karaganda*. 2020. № 2 (98). С. 119–126.
29. Hevko I., Lyashuk O., Sokil M., Slobodian L., Hud V., Vovk Yu. Resonant oscillation of vertical working part of conveyor-loader. *Karaganda State University Publishing House*. 2019. № 2 (94). С. 73–81.
30. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.-V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A. Enhancement of agricultural materials separation efficiency using a multi-purpose screw conveyor-separator. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, № 4. P. 870. DOI: 10.3390/agriculture13040870.

References

1. Vasylykiv, V. V., Hevko, I. B., & Babaryka, S. F. (2009). *Synthesis of new designs of screw working bodies of machines for the application of solid organic fertilizers*. *Visnyk of Dnipropetrovsk State Agrarian University*, (2), 170–173 [in Ukrainian].
2. Hevko, I. B., & Huryk, O. Ya. (2002). *Determination of dynamic loads in a screw mixer*. *Visnyk of Lviv Polytechnic National University. Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrumentation*, (442), 90–93 [in Ukrainian].
3. Hevko, I. B. (2011). *Modeling the nature of the load on screw working bodies*. *Herald of TNTU*, 16(1), 69–77 [in Ukrainian].
4. Hevko, I., Liubachivskyi, R., & Dyachun, A. (2012). *Synthesis of mixers with screw working bodies*. *Visnyk of Lviv National Agrarian University. Agroengineering research*, (16), 237–246 [in Ukrainian].
5. Hevko, I. B. (1997). *Development and research of low-frequency devices for performing technological processes with flexible screw conveyors*. Extended abstract of candidate's thesis. Lutsk [in Ukrainian].
6. Hevko, I. B. (2012). *Structural synthesis of impulse safety clutches and screws by morphological analysis method*. *Herald of TNTU*, (3/67), 121–134 [in Ukrainian].
7. Hevko, I. B., Vitroviy, A. O., & Huryk, O. Ya. (2001). *Dynamic model of the process of bulk material transportation by screw conveyor*. *Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (8), 72–82. Lutsk [in Ukrainian].
8. Hevko, I. B., & Hud, V. Z. (2019). *Synthesis of screw conveyors with technological transformation capabilities and mobile change of material transfer trajectory*. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 2(33), 25–33 [in Ukrainian].
9. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., & Liubachivskyi, R. O. (2012). *Structural synthesis of screw conveyors with expanded technological capabilities by the method of morphological analysis*. *Visnyk of SevNTU: Collection of Scientific Papers. Series: Mechanical Engineering and Transport*, (128), 37–41. Sevastopol [in Ukrainian].
10. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., & Klendii, V. M. (2014). *Synthesis of screw conveyors with flexible working bodies*. *Visnyk of Lviv National Agrarian University. Agroengineering research*, (18), 112–121 [in Ukrainian].
11. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Pik, A. I., Marchuk, N. M., & Marunych, O. P. (2020). *Synthesis of screw conveyor-mixers*. *Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (45), 35–44. Lutsk [in Ukrainian].
12. Hevko, I., Dovbush, T., Tson, O., Dovbush, A., & Stanko, A. (2021). *Synthesis of screw working bodies with elastic surfaces and results of their research*. *Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (47), 63–72. Lutsk [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubyniak, T. S., Navrotska, T. D., & Kruhlik, O. A. (2019). *Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research*. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Dmytriv, D. V., Hevko, I. B., & Levenets, V. B. (2007). *Reliability of screw-mixing devices*. *Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (16), 62–74. Lutsk [in Ukrainian].
15. Hevko, B. M., Danylchenko, M. H., Rohatynskyi, R. M., et al. (1993). *Mechanisms with screw devices*. Lviv: Svit [in Ukrainian].
16. Pylypets, M. I., Hevko, I. B., & Vitroviy, A. O. (2000). *Optimization of the working body with an elastic shaft for flexible screw conveyors*. *Visnyk of Lviv Polytechnic National University. Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrumentation*, (412), 84–91 [in Ukrainian].
17. Rohatynskyi, R. M., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Hud, V. Z., Dyachun, A. Ye., Melnychuk, A. L., & Slobodian, L. M. (2019). *Promising screw conveyors: design, calculation, research*. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].

18. Pylypets, M. I., Hevko, I. B., & Vitrovyi, A. O. (1999). *Optimization of the working body with sectional elements for flexible screw conveyors. Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (5), 207–217. Lutsk [in Ukrainian].
19. Rohatynskiy, R. O., Hevko, I. B., & Rohatynska, L. R. (2013). *Optimization of parameters of screw transport-technological systems. Herald of TNTU*, (1/69), 116–125 [in Ukrainian].
20. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Dyachun, A. Ye. (2014). *Scientific and applied foundations of creating screw transport-technological mechanisms*. Ternopil: TNTU named after I. Puliui [in Ukrainian].
21. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Dmytriv, D. V. (2000). *Modeling the operation of a small-sized blade-screw mixer. Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (6), 129–135. Lutsk [in Ukrainian].
22. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Dmytriv, D. V., Hud, V. Z., & Dmytriv, O. R. (2020). *Modeling the mixing of components by screw conveyor-mixers. Agricultural Machines: Collection of Scientific Articles*, (45), 84–93. Lutsk [in Ukrainian].
23. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Hud, V. Z., Rohatynska, L. R., & Klendii, V. M. (2015). *Investigation of the stability of the torsional vibrations of a screw conveyor under the influence of pulse forces. INMATEH – Agricultural Engineering*, 45(1), 77–86.
24. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Leshchuk, R. Y., Rohatynska, L. R., & Melnychuk, A. L. (2016). *Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyors. INMATEH – Agricultural Engineering*, 48(1), 35–42.
25. Lyashuk, O., Rohatynskiy, R., Hevko, I., Dmytriv, O., Tson, O., Tkachenko, I., Sokol, M., Leshchuk, R., & Kobelnik, V. (2023). *Investigation of bulk material transportation by screw conveyor with hinge-pan operating device. Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipment*, 948, 169–182. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
26. Hud, V., Rohatynskiy, R., Hevko, I., Lyashuk, O., Pic, A., & Huryk, O. (2020). *Research in resonant oscillations of the telescopic screw-granular media system caused by external periodic forces. INMATEH – Agricultural Engineering*, 60(1), 29–36.
27. Lyashuk, O. L., Hevko, I. B., Hud, V. Z., Tkachenko, I. G., Hevko, O. V., Sokol, M. O., Tson, O. P., Kobelnik, V. R., Shmatko, D. Z., & Stanko, A. I. (2022). *Research of non-resonant oscillations of the “telescopic screw-fluid medium” system. INMATEH – Agricultural Engineering*, 68(3), 499–510.
28. Hud, V., Hevko, I., Lyashuk, O., Hevko, O., Sokil, M., & Shust, I. (2020). *Research of resonance vibrations of the system “Telescopic screw-bulk medium” caused by torsional vibrations. Karaganda*, 2(98), 119–126.
29. Hevko, I., Lyashuk, O., Sokil, M., Slobodian, L., Hud, V., & Vovk, Yu. (2019). *Resonant oscillation of vertical working part of conveyor-loader. Karaganda State University Publishing House*, 2(94), 73–81.
30. Hud, V., Hevko, I., Lyashuk, O., Ungureanu, N., Vlăduț, N.-V., Stashkiv, M., Hevko, O., & Pik, A. (2023). *Enhancement of agricultural materials separation efficiency using a multi-purpose screw conveyor-separator. Agriculture*, 13(4), 870. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>.

Ivan Hevko, Prof., DSc. **Roman Rohatynskiy**, Prof., DSc., **Andrii Diachun**, Assoc. Prof., Ph.D.,

Taras Dovbush, Assoc. Prof., Ph.D., **Anatoly Dovbush**, **Andriy Nikityuk**

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Synthesis of Twin-Shaft Screw Conveyor Mixers

Twin-shaft screw conveyors are often used to move piece goods, especially in conveyor lines in the food industry when filling various containers, but are also used to transport bulk materials. However, they are also widely used as mixers of loose and viscous materials as twin-shaft screw conveyors-mixers. Therefore, when using twin-shaft screw conveyors-mixers, they can act as conveyors-mixers with the functions of mixing and moving materials, or simply as mixers. To create effective designs of twin-shaft screw conveyor mixers that can provide high mixing uniformity with significant process performance and satisfactory cost, it is advisable to generate their rational variants with subsequent theoretical and experimental research and obtaining the most suitable designs for practical use. The use of morphological analysis in generating alternatives using structural-schematic synthesis ensures the receipt of a significant number of design options for technical solutions, and therefore can be fully applied in generating twin-shaft screw conveyors-mixers.

To create twin-shaft screw conveyor mixers, their designs were generated using an improved synthesis method using morphological analysis, which involves the use of expert assessments and the division of individual hierarchical groups into subgroups based on the importance of individual features of structural elements. As a result of an expert assessment of the influence of various factors on the mixing operation of twin-shaft screw conveyor mixers, certain features of the structural elements of these mechanisms, as well as their interconnections, have been established. This ensured the construction of a morphological table of individual features of the structural elements of twin-shaft screw conveyors-mixers, and on its basis, accordingly, a model of the mechanical system "Twin-shaft screw conveyor-mixer". As a result of expert analysis during the implementation of the structural and schematic synthesis of twin-shaft screw conveyors-mixers, the following main morphological features of its structural elements were selected: drive: type, type of movement, direction of movement, quantity, speed; chute design; screw working elements: spiral profile, spiral design, spiral diameter, spiral location; hopper: profile, quantity, location, loading mechanism; unloading mechanism; locomotor mechanism.

This made it possible to obtain a significant number of effective variants of technical solutions for twin-shaft screw conveyor mixers with various design features. In particular, design schemes of mixers with different profiles, spiral designs and arrangement of spirals relative to each other. The synthesized designs of twin-shaft screw conveyors-mixers enable extensive research of screw mixing systems with the establishment of their design and technological parameters and the selection of rational designs.

morphological analysis, structural-schematic synthesis, twin-shaft, screw, conveyor, mixer, mixing, screw

Одержано (Received) 25.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 621.82

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.115-125](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.115-125)

А. Є. Дячун, доц., канд. техн. наук, І. Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, О. Ю. Стібайло, Р. Я. Лещук, доц., канд. техн. наук, Р. В. Комар, доц., канд. техн. наук,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
E-mail: gevkoivan1@ukr.net

Теоретичне дослідження технологічного процесу оброблення зовнішньої крайки гвинтових елементів сільськогосподарської техніки

В даній роботі викладено теоретичне дослідження технологічного процесу оброблення зовнішньої крайки гвинтових елементів сільськогосподарської техніки. В процесі токарного оброблення та загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента переміщення ріжучих інструментів вздовж осі обертання гвинтового елемента з подачею, що дорівнює кроку витків, обертовий рух гвинтового елемента, геометричні параметри, їх відхилення та матеріал початкової заготовки визначають параметри якості формоутворення зовнішньої крайки гвинтового елемента. Крім цього, якість обробленої поверхні визначається: точністю оброблювальної системи (до якої входить інструмент, елементи базування та затиску заготовки, верстат), змінними параметрами сили різання, деформацією заготовки, зношенням інструменту, жорсткістю та вібростійкістю елементів системи оброблення заготовки. Встановлено, що збільшення ширини зрізаної частини витка гвинтового елемента та відстані між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється, до центра круглої ріжучої пластини різця, призводить до зростання площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається, а відповідно і сили різання. Також встановлено, для забезпечення різного кута загострення крайки гвинтового елемента, а також для зміни навантаження на різець відстань між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється, до центра круглої ріжучої пластини різця потрібно забезпечити регульованою.

технологічний процес, дослідження, гвинтова спіраль, заготовка, різцетримач, точність оброблення, ріжучий інструмент, верстат, подача, елемент, заточування, крайка, операція

Постановка проблеми. Незважаючи на попередні дослідження проточування зовнішньої крайки гвинтових елементів, не було розглянуто динаміку проточування і заточування зовнішньої крайки гвинтового елемента із врахуванням вібрацій заготовки, інструмента, елементів базування та закріплення заготовки, різцетримача верстата. Крім цього попередні дослідження пов'язані із проточування зовнішньої крайки гвинтового елемента із малою подачею прохідного різця (0,1...0,3 мм/об), відповідно довжина робочої крайки різця, що залучалась у процес різання у декілька разів є меншою, ніж при заточуванні зовнішньої крайки гвинтового елемента, що призводить до значного збільшення сили різання, а відповідно і до вібрацій інструмента та заготовки. А миттєве значення сили різання та її вплив на динамічні параметри процесу проточування зовнішньої крайки гвинтового елемента визначають якість обробленої поверхні та потребують подальшого теоретичного та експериментального дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичним та експериментальним дослідженням різноманітних технологічних процесів виготовлення та оброблення різних типів гвинтових спіралей присвячено багато праць. При цьому слід відмітити значний вклад таких вчених, як Гевко Б.М. [1, 2], Пилипець М.І. [3, 4], Васильків В.В. [3-6] та багатьох інших [7-21]. Вони використовували різні багатогранні методи для пошуку нових способів виготовлення та оброблення різних типів гвинтових спіралей. При цьому їхня увага концентрувалася на пошуку найбільш технологічно та економічно ефективних технологій, що давали найвищий ефект. Попри те ще багато питань пов'язаних

із пошуком та дослідженням різнотипних спіралей шнеків чекають свого вивчення.

Постановка завдання. Метою роботи є теоретичне дослідження технологічного процесу оброблення зовнішньої крайки гвинтових елементів сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу. В процесі токарного оброблення та загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента переміщення ріжучих інструментів вздовж осі обертання гвинтового елемента з подачею, що дорівнює кроку витків, обертовий рух гвинтового елемента, геометричні параметри, їх відхилення та матеріал початкової заготовки визначають параметри якості формоутворення зовнішньої крайки гвинтового елемента. Крім цього, якість обробленої поверхні визначається: точністю оброблювальної системи (до якої входить інструмент, елементи базування та затиску заготовки, верстат), змінними параметрами сили різання, деформацією заготовки, зношенням інструменту, жорсткістю та вібростійкістю елементів системи оброблення заготовки.

В процесі проектування технологічного процесу виготовлення гвинтових елементів [10, 11] для операції заточування зовнішньої крайки гвинтового елемента використано спеціальний інструмент, зображений на рис. 1, основною перевагою якого порівняно із прохідним різцем, є усунення можливості утворення заусенців на вершині обробленої крайки. Заточування зовнішньої крайки гвинтового елемента 1, встановленого на оправці 4 із затискним елементом 3, виконується ріжучою пластиною 5 інструмента 2 (рис. 1). Ріжуча пластина 6 використовується для запобігання формуванню заусенців. Основними рухами є обертання гвинтового елемента із частотою n , та подача різця S , що дорівнює кроку витків гвинтового елемента.

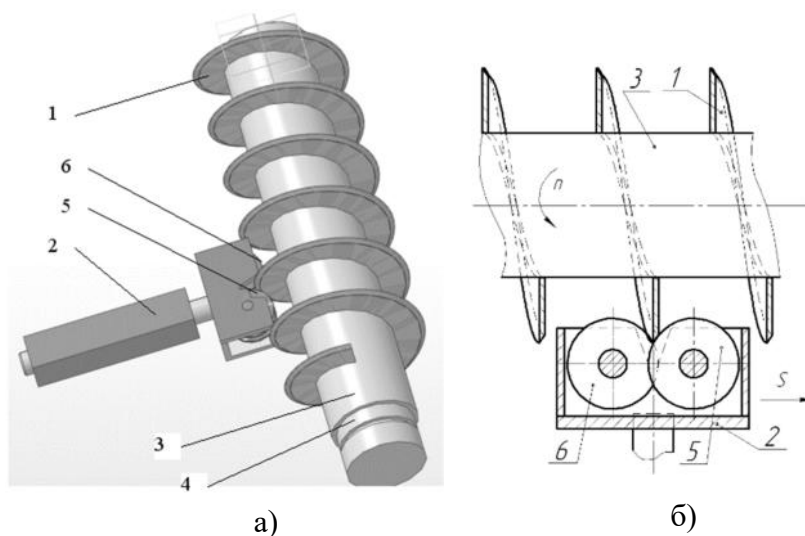


Рисунок 1 – Схема операції заточування зовнішньої крайки гвинтового елемента:

а) трьохмірне зображення; б) переріз в зоні різання; 1 – заготовка гвинтового елемента; 2 – ріжучий інструмент; 3 – затискний елемент; 4 – оправка; 5 – ріжуча пластина для заточування крайки гвинтового елемента; 6 – ріжуча пластина для запобігання формуванню заусенців

Джерело: розроблено авторами

Дані миттєвих значень сили різання, одержаних в результаті експериментальних досліджень передавались на прикладне програмне забезпечення, при цьому визначалось середнє значення сили різання під час усталеного режиму заточування зовнішньої крайки гвинтового елемента. Середнє значення складових сили різання можна апроксимували степеневими залежностями:

$$P_z = C_z H^{a_z} R_1^{b_z} V^{k_z}, \quad (1)$$

$$P_z = C_{1z} F^{m_z} V^{k_z}, \quad (2)$$

$$P_x = C_x H^{a_x} R_1^{b_x} V^{k_x}, \quad (3)$$

$$P_x = C_{1x} F^{m_x} V^{k_x}, \quad (4)$$

де $C_z, a_z, b_z, k_z, m_z, C_x, a_x, b_x, k_x, m_x$ – емпіричні коефіцієнти, що використовуються для апроксимації даних експериментальних досліджень складових сили різання; H – ширина зрізаної частини витка гвинтового елемента; R_1 – радіус ріжучої пластини різця; V – швидкість різання; F – середнє значення площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається.

Змінні значень величини сили різання при заточуванні гвинтових елементів можна представити залежністю:

$$P_z(t) = C_z H^{a_z} R_1^{b_z} V^{k_z} + \sum_{i=1}^j P_{zi} \sin(\omega_{zi} t + b_{zi}); \quad (5)$$

$$P_x(t) = C_x H^{a_x} R_1^{b_x} V^{k_x} + \sum_{i=1}^j P_{xi} \sin(\omega_{xi} t + b_{xi}); \quad (6)$$

$$P_y(t) = C_y H^{a_y} R_1^{b_y} V^{k_y} + \sum_{i=1}^j P_{yi} \sin(\omega_{yi} t + b_{yi}), \quad (7)$$

де P_{zi}, P_{xi}, P_{yi} – амплітуди коливань складових сили різання i -ї гармоніки; $\omega_{zi}, \omega_{xi}, \omega_{yi}$ – циклічні частоти коливань складових сили різання i -ї гармоніки; b_{zi}, b_{xi}, b_{yi} – початкові фази коливань складових сили різання i -ї гармоніки; j – кількість гармонік для апроксимації даних експериментальних досліджень зміни складових сили різання.

В процесі токарного оброблення та загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента виникає зміна параметрів різання, зокрема глибини різання та миттєвої площі зрізування стружки. Це пов'язано із геометричними похибками попередньо сформованої гвинтової заготовки методом навивання на оправу та розтягу на крок, що зображено на рис. 2, а також за рахунок коливання ріжучої кромки різця.

Такі похибки включають:

1. Відхилення від ідеальної гвинтової поверхні ΔT , зокрема зростаючу, спадаючу, періодичну зміну кроку витків на декількох послідовних витках, хвилястість витків, похибку форми витків.

2. Відхилення зовнішнього радіуса витків ΔR , зокрема його хвилястість, огранку, відхилення від круглості, ексцентриситет, відхилення від циліндричності витка на всій довжині гвинтового елемента (конусність, бочкоподібність), шорсткість.

Зміна глибини різання та миттєвої площі зрізування стружки в процесі токарного оброблення та загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента призводить до зміни проєкцій сили різання та коливань різця і заготовки. Така складна взаємодія викликає необхідність дослідження динаміки загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента спеціальним різцем.

Величину миттєвої площі зрізування стружки в процесі ідеального загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента визначаємо із розрахункової схеми рисунка 3.

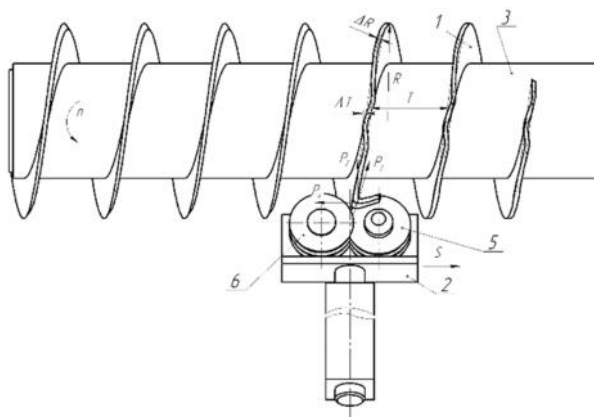


Рисунок 2 – Схема розташування похибок попередньо сформованої гвинтової заготовки методом навивання на оправу та розтягу на крок: 1 – заготовка гвинтового елемента; 2 – ріжучий інструмент; 3 – затискний елемент; 4 – оправка; 5 – ріжуча пластина для заточування крайки гвинтового елемента; 6 – ріжуча пластина для запобігання формуванню заусенців

Джерело: розроблено авторами

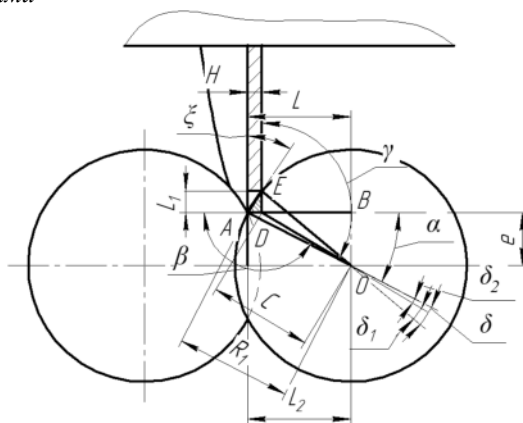


Рисунок 3 – Розрахункова схема для визначення миттєвої площі зрізування стружки в процесі ідеального загострення зовнішньої крайки гвинтового елемента

Джерело: розроблено авторами

Площу зрізування стружки визначаємо як суму площі трикутника із сторонами L_1 , H та сектора зрізу із радіусом R_1 . Площу трикутника із сторонами L_1 , H визначаємо за відомою формулою:

$$F_t = \frac{HL_1}{2}. \quad (8)$$

Для визначення величини L_1 виконуємо ряд геометричних розрахунків. Визначаємо кут α трикутника OAB :

$$\cos \alpha = \frac{L_2}{R_1}, \quad (9)$$

де L_2 - відстань між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється до центра круглої ріжучої пластини різця.

Із трикутника OAD за теоремою косинусів визначаємо відстань від вершини ребра гвинтового елемента до центра ріжучої пластини різця:

$$C = \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HR_1 \cos \alpha}. \quad (10)$$

Із врахуванням (9):

$$C = \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2} . \quad (11)$$

Із трикутника OAD за теоремою косинусів визначаємо кут β :

$$\beta = \arccos\left(\frac{H^2 + C^2 - R_1^2}{2HC}\right), \quad (12)$$

Із врахуванням (11):

$$\beta = \arccos\left(\frac{H^2 - HL_2}{H\sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right). \quad (13)$$

Визначаємо кут γ трикутника ODE :

$$\gamma = \frac{3}{2}\pi - \beta, \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{3}{2}\pi - \arccos\left(\frac{H^2 - HL_2}{H\sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right). \quad (15)$$

Із трикутника ODE за теоремою косинусів визначаємо величину L_1 :

$$L_1 = C \cos \gamma + \sqrt{C^2 (\cos^2 \gamma - 1) + R_1^2} . \quad (16)$$

$$L_1 = \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2} \cos \gamma + \sqrt{(H^2 + R_1^2 - 2HL_2)(\cos^2 \gamma - 1) + R_1^2} . \quad (17)$$

Із врахуванням того, що $\cos \gamma = -\sin \beta$, $\sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta}$ рівняння (17) набуде вигляду:

$$L_1 = -\sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2} \sqrt{1 - \frac{(H^2 - HL_2)^2}{H^2(H^2 + R_1^2 - 2HL_2)}} + \sqrt{-\frac{(H^2 - HL_2)^2}{H^2} + R_1^2} . \quad (18)$$

Підставляємо дані у рівняння (8):

$$F_t = -\frac{H}{2} \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2} \sqrt{1 - \frac{(H^2 - HL_2)^2}{H^2(H^2 + R_1^2 - 2HL_2)}} + \sqrt{-\frac{(H^2 - HL_2)^2}{H^2} + R_1^2} . \quad (19)$$

Площу сектора зрізу із дугою AE і радіусом R_1 визначаємо за формулою:

$$F_d = \frac{R_1^2 (\delta - \sin \delta)}{2}, \quad (20)$$

де δ – кут сектора із дугою AE .

Кут сектора із дугою AE знаходимо як суму двох кутів:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2, \quad (21)$$

де δ_1 - кут між сторонами OD і OE трикутника ODE ; δ_2 - кут між сторонами OD і OA трикутника OAD .

Кут між сторонами OD і OE трикутника ODE визначаємо на основі теореми синусів:

$$\delta_1 = \arcsin\left(\frac{L_1 \sin \gamma}{R_1}\right). \quad (22)$$

Із врахуванням того, що $\sin \gamma = -\cos \beta$, рівняння (22) набуде вигляду:

$$\delta_1 = \arcsin\left(\frac{-L_1 \cos \beta}{R_1}\right); \quad (23)$$

$$\delta_1 = \arcsin\left(\frac{-L_1(H^2 - HL_2)}{R_1 H \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right). \quad (24)$$

Кут між сторонами OD і OA трикутника OAD :

$$\delta_2 = \pi - \alpha - \beta; \quad (25)$$

$$\delta_2 = \pi - \arccos\left(\frac{L_2}{R_1}\right) - \arccos\left(\frac{H^2 - HL_2}{H \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right). \quad (26)$$

Підставляємо дані у формулу (21):

$$\delta = \arcsin\left(\frac{-L_1(H^2 - HL_2)}{R_1 H \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right) + \pi - \arccos\left(\frac{L_2}{R_1}\right) - \arccos\left(\frac{H^2 - HL_2}{H \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right). \quad (27)$$

Кут загострення ξ крайки гвинтового елемента визначаємо за формулою:

$$\xi = \frac{\delta}{2} + \alpha. \quad (28)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\arcsin\left(\frac{-L_1(H^2 - HL_2)}{R_1 H \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right) + \pi + \arccos\left(\frac{L_2}{R_1}\right) - \arccos\left(\frac{H^2 - HL_2}{H \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2}}\right) \right). \quad (29)$$

Середнє значення площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається:

$$F = F_t + F_d; \quad (30)$$

$$F = -\frac{H}{2} \sqrt{H^2 + R_1^2 - 2HL_2} \sqrt{1 - \frac{(H^2 - HL_2)^2}{H^2(H^2 + R_1^2 - 2HL_2)}} + \sqrt{-\frac{(H^2 - HL_2)^2}{H^2} + R_1^2} + \frac{R_1^2(\delta - \sin \delta)}{2}. \quad (31)$$

На основі рівняння (31) побудовано графіки залежності площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається від ширини зрізаної частини витка гвинтового елемента (рис. 4), радіуса ріжучої пластини різця (рис. 5) та відстані між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється до центра круглої ріжучої пластини різця (рис. 6).

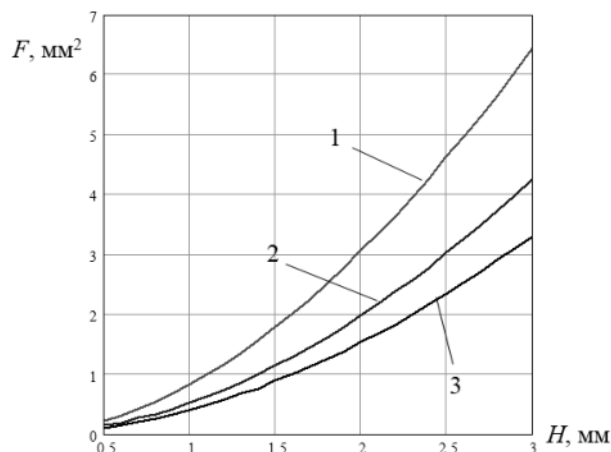


Рисунок 4 – Графічні залежності площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається від ширини зрізаної частини витка гвинтового елемента, $L_2=14$ мм: 1) $R_1=16$ мм; 2) $R_1=19$ мм; 3) $R_1=22$ мм
Джерело: розроблено авторами

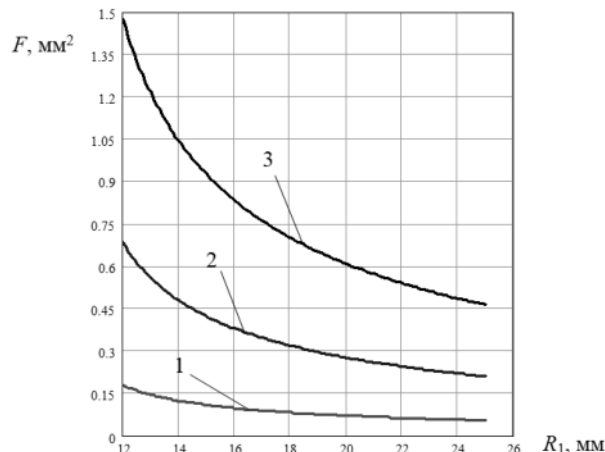


Рисунок 5 – Графічні залежності площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається від радіуса ріжучої пластини різця, $L_2=10$ мм: 1) $H=0,5$ мм; 2) $H=1$ мм; 3) $H=1,5$ мм
Джерело: розроблено авторами

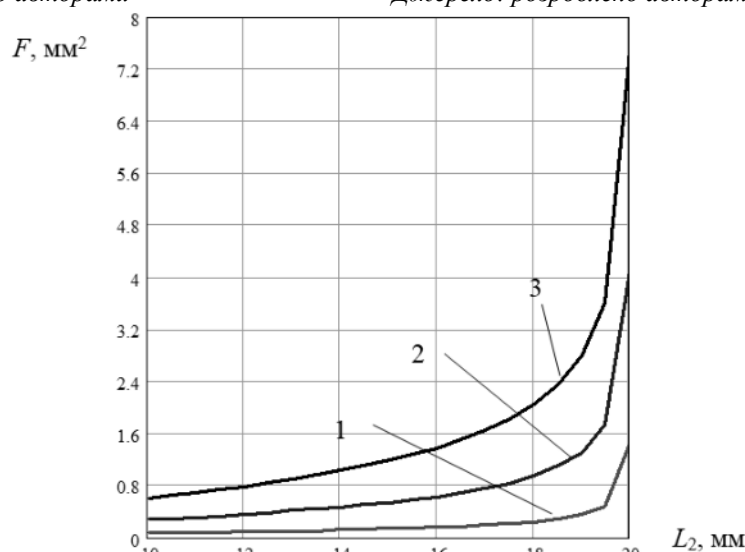


Рисунок 6 – Графічні залежності площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається від відстані між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється до центра круглої ріжучої пластини різця, $R_1=20$ мм: 1) $H=0,5$ мм; 2) $H=1$ мм; 3) $H=1,5$ мм
Джерело: розроблено авторами

На основі рівняння (29) побудовано графіки залежності кута загострення ξ крайки гвинтового елемента, що зрізається від радіуса ріжучої пластини різця (рис. 7) та відстані між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється до центра круглої ріжучої пластини різця (рис. 8).

Із аналізу графіків рис. 4 – 8 встановлено, що збільшення ширини H зрізаної частини витка гвинтового елемента та відстані L_2 між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється, до центра круглої ріжучої пластини різця, призводить до

зростання площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається, а відповідно і сили різання, при цьому збільшення радіуса R_1 ріжучої пластини різця призводить до зменшення величини вказаних параметрів.

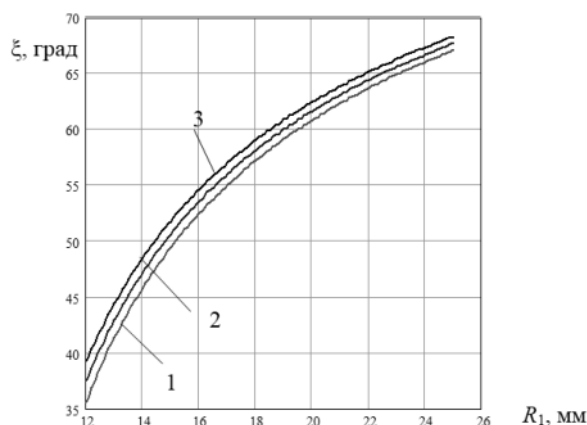


Рисунок 7 – Графічні залежності кута загострення кромки гвинтового елемента від радіуса ріжучої пластини різця, $L_2=10$ мм:

1) $H=0,5$ мм; 2) $H=1$ мм; 3) $H=1,5$ мм

Джерело: розроблено авторами

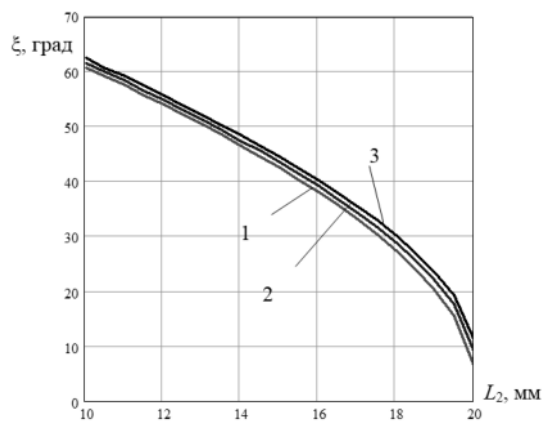


Рисунок 8 – Графічні залежності кута загострення кромки гвинтового елемента від відстані між вершиною кромки гвинтового елемента, що загострюється до центра круглої ріжучої пластини різця, $R_1=20$ мм: 1) $H=0,5$ мм; 2) $H=1$ мм; 3) $H=1,5$ мм

Джерело: розроблено авторами

Суттєве зростання площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається, а отже і сили різання спостерігається при наближенні величини L_2 до значення радіуса R_1 ріжучої пластини різця (рис. 6) із співвідношенням $R_1/L_2 < 1,1$. Одночасно збільшення радіуса R_1 ріжучої пластини різця призводить до збільшення кута загострення кромки гвинтового елемента, а збільшення величини L_2 – до зменшення. Тому раціональними співвідношеннями R_1/L_2 у конструкції різця є величини від 1,4 до 1,8, що дозволяють зменшити площу частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається від 1,54 до 2,21 рази, забезпечуючи кут загострення кромки гвинтового елемента від 47 градусів до 57 градусів. Ширина зрізаної частини витка гвинтового елемента має незначний вплив на кут загострення кромки гвинтового елемента. Також, для забезпечення різного кута загострення кромки гвинтового елемента, а також для зміни навантаження на різець відстань між вершиною кромки гвинтового елемента, що загострюється, до центра круглої ріжучої пластини різця потрібно забезпечити регульованою.

Висновки. Проведено теоретичне дослідження технологічного процесу оброблення зовнішньої кромки гвинтових елементів сільськогосподарської техніки. В процесі токарного оброблення та загострення зовнішньої кромки гвинтового елемента переміщення ріжучих інструментів вздовж осі обертання гвинтового елемента з подачею, що дорівнює кроку витків, обертовий рух гвинтового елемента, геометричні параметри, їх відхилення та матеріал початкової заготовки визначають параметри якості формоутворення зовнішньої кромки гвинтового елемента. Крім цього, якість обробленої поверхні визначається: точністю оброблювальної системи (до якої входить інструмент, елементи базування та затиску заготовки, верстат), змінними параметрами сили різання, деформацією заготовки, зношенням інструменту, жорсткістю та вібростійкістю елементів системи оброблення заготовки.

Встановлено, що збільшення ширини H зрізаної частини витка гвинтового елемента та відстані L_2 між вершиною кромки гвинтового елемента, що загострюється, до центра круглої ріжучої пластини різця, призводить до зростання площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається, а відповідно і сили різання, при цьому збільшення радіуса R_1 ріжучої пластини різця призводить до зменшення величини

вказаних параметрів. Суттєве зростання площі частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається, а отже і сили різання спостерігається при наближенні величини L_2 до значення радіуса R_1 ріжучої пластини різця із співвідношенням $R_1/L_2 < 1,1$. Одночасно збільшення радіуса R_1 ріжучої пластини різця призводить до збільшення кута загострення крайки гвинтового елемента, а збільшення величини L_2 – до зменшення. Тому раціональними співвідношеннями R_1/L_2 у конструкції різця є величини від 1,4 до 1,8, що дозволяють зменшити площу частини матеріалу гвинтового елемента, що зрізається від 1,54 до 2,21 рази, забезпечуючи кут загострення крайки гвинтового елемента від 47 градусів до 57 градусів. Ширина зрізаної частини витка гвинтового елемента має незначний вплив на кут загострення крайки гвинтового елемента. Також, для забезпечення різного кута загострення крайки гвинтового елемента, а також для зміни навантаження на різець відстань між вершиною крайки гвинтового елемента, що загострюється, до центра круглої ріжучої пластини різця потрібно забезпечити регульованою.

Список літератури

1. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок деталей машин. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с.
2. Гевко Б. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Драган А. П., Новосад І. Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. 367 с.
3. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. *Перспективні технології та прилади*. 2021. Вип. 18. С. 112–123.
4. Vasylyk V., Pylypets M., Danylenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. Vol. 104, № 4. P. 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033
5. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.
6. Васильків В. В., Радик Д. Л., Гевко І. Б. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату. *Наукові нотатки*. ЛДТУ. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
7. Hevko I. B., Dyachun A. Ye., Lyashuk O. L., Martsenko S. V., Gypka A. B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 49, № 2. P. 77–82.
8. Hevko I., Diachun A., Lyashuk O., Vovk Yu., Hupka A. Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proc. of the 4th Int. Conf. DSMIE 2021*. Lviv, 2021. Vol. 1. P. 385–394.
9. Lyashuk O., Rogatynskyy R., Hevko I., Navrotska T., Diachun A. Study of power parameters of the screw spirals forming. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. DSMIE 2024*. Pilsen, 2024. Vol. 1. P. 287–298.
10. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Дубиняк Т. С., Стібайло О. Ю., Гупка А. Б. Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 75–83.
11. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Дубиняк Т. С., Стібайло О. Ю., Золотий Р. З. Дослідження операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 99–108.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Гупка А. Б., Третяков О. Л. Технологічне проектування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 457 с.
13. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
14. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 280 с.
15. Hevko I., Pik A., Komar R., Stibaylo O., Koval S. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU*. 2024. Vol. 113, № 1. P. 5–15.
16. Rogatynskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyuk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. № 2. P. 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007>
17. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
18. Гевко І. Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. 2011. Т. 16, № 1. С. 69–77.

19. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Брикса А. О., Стібайло О. Ю., Коваль С. О. Особливості конструкцій і технологічного проєктування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. 2. С. 24–34.
20. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Комар Р. В., Ткаченко І. Г., Гупка А. Б. Технологічне проєктування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 109–116.
21. Гевко І. Б., Стібайло О. Ю., Лещук Р. Я., Гурик О. Я., Гупка А. Б. Техніко-економічне обґрунтування способів виготовлення шнекових спіралей, оснащених лопатевими, різальними та подрібнювальними елементами. *Перспективні технології та прилади*. 2025. Вип. 26. С. 29–37.

References

1. Hevko, B. M., Pylypets, M. I., Vasyukiv, V. V., & Radyk, D. L. (2009). *Tekhnologichni osnovy formoutvorennia riznoprofil'nykh hvyntovykh zahotovok detalei mashyn* [Technological bases of shaping multi-profile screw blanks of machine parts]. Ternopil: TDTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
2. Hevko, B. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Drahan, A. P., & Novosad, I. Ya. (2008). *Tekhnologichni osnovy formoutvorennia spetsial'nykh profil'nykh hvyntovykh detalei* [Technological bases of shaping special profile screw parts]. Ternopil: TDTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
3. Pylypets, M. I., Vasyukiv, V. V., Radyk, D. L., & Pylypets, O. M. (2021). *Peredumovy rozroblennia kombinovanykh operatsii vyhotovlennia hvyntovykh i shnekovykh zahotovok metodom obrobky metaliv tyskom* [Prerequisites for developing combined operations for manufacturing screw and auger blanks by metal forming]. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, 18, 112–123 [in Ukrainian].
4. Vasyukiv, V., Pylypets, M., Danylenko, L., & Radyk, D. (2021). Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*, 104(4), 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033
5. Vasyukiv, V. V. (2015). *Rozvytok naukovo-prykladnykh osnov rozroblennia tekhnolohii vyrobnytstva hvyntovykh i shnekovykh zahotovok z vykorystanniam unifikatsii* [Development of scientific and applied bases of screw and auger billet manufacturing technologies using unification]. Extended abstract of Doctor's thesis. Lviv [in Ukrainian].
6. Vasyukiv, V. V., Radyk, D. L., & Hevko, I. B. (2004). *Tekhnolohichni ta konstruktyvni osoblyvosti vyhotovlennia hvyntovykh zahotovok z lystovoho prokatu* [Technological and design features of manufacturing screw blanks from sheet metal]. *Naukovi notatky. LDTU*, 14, 12–18 [in Ukrainian].
7. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Lyashuk, O. L., Martsenko, S. V., & Gypka, A. B. (2016). Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 49(2), 77–82.
8. Hevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Vovk, Yu., & Hupka, A. (2021). Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proceedings of the 4th International Conference DSMIE 2021* (Vol. 1, pp. 385–394). Lviv.
9. Lyashuk, O., Rogatynskyy, R., Hevko, I., Navrotska, T., & Diachun, A. (2024). Study of power parameters of the screw spirals forming. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proceedings of the 7th International Conference DSMIE 2024* (Vol. 1, pp. 287–298). Pilsen.
10. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Hupka, A. B. (2025). *Tekhnolohichni osoblyvosti vyhotovlennia nozhiv-podribniuvachiv na spiralkh shnekiv* [Technological features of manufacturing cutting knives on screw spirals]. *Tsentrlnoukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), part 1, 75–83 [in Ukrainian].
11. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Zoloty, R. Z. (2025). *Doslidzhennia operatsii tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia nozhiv-podribniuvachiv na spiralkh shnekiv* [Research of technological process operations of manufacturing cutting knives on screw spirals]. *Tsentrlnoukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), part 2, 99–108 [in Ukrainian].
12. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Dyachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). *Tekhnolohichne proiektuvannia ta vyhotovlennia hvyntovykh transportno-tekhnolohichnykh robochykh orhaniv* [Technological design and manufacturing of screw transport and technological working bodies]. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
13. Rogatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Hud, V. Z., Dyachun, A. Ye., Melnychuk, A. L., & Slobodian, L. M. (2019). *Perspektyvni hvyntovi konveieri: konstruktzii, rozrakhunok, doslidzhennia* [Promising screw conveyors: design, calculation, research]. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Rogatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Dyachun, A. Ye. (2014). *Naukovo-prykladni osnovy stvorennia hvyntovykh transportno-tekhnolohichnykh mekhanizmiv* [Scientific and applied bases of creating screw transport-technological mechanisms]. Ternopil: TNTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
15. Hevko, I., Pik, A., Komar, R., Stibaylo, O., & Koval, S. (2024). Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU*, 113(1), 5–15.
16. Rogatynskiy, R., Hevko, I., Gypka, A., Garmatyk, O., & Martsenko, S. (2017). Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agriculturae*, 2, 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007>
17. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubyniak, T. S., Navrotska, T. D., & Kruhlyk, O. A. (2019). *Hnuchki hvyntovi konveieri: proiektuvannia, tekhnolohiia vyhotovlennia, eksperymental'ni doslidzhennia* [Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research]. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].

18. Hevko, I. B. (2011). Modeliuvannya kharakteru navantazhennia na hvyntovi robochi orhany [Modeling the load character of screw working bodies]. *Visnyk TNTU*, 16(1), 69–77 [in Ukrainian].
19. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., Stibailo, O. Yu., & Koval, S. O. (2023). Osoblyvosti konstrukttsii i tekhnologichnoho proektuvannia robochykh orhaniv lopatevykh hvyntovykh zmishuvachiv [Design features and technological design of working bodies of blade screw mixers]. *Tsentrlnoukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39), part 2, 24–34 [in Ukrainian].
20. Hevko, I. B., Rohatynskyi, R. M., Komar, R. V., Tkachenko, I. H., & Hupka, A. B. (2025). Tekhnologichne proektuvannia sposobiv vyhotovlennia U-podibnykh hvyntovykh poverkhon' transportnykh trub [Technological design of manufacturing methods of U-shaped screw surfaces of transport pipes]. *Tsentrlnoukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), part 2, 109–116 [in Ukrainian].
21. Hevko, I. B., Stibailo, O. Yu., Leshchuk, R. Ya., Huryk, O. Ya., & Hupka, A. B. (2025). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia sposobiv vyhotovlennia shnekovykh spiralei, osnashchennykh lopatevymy, rizal'nymy ta podribniuval'nymy elementamy [Technical and economic justification of methods for manufacturing auger spirals equipped with blade, cutting and shredding elements]. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady*, 26, 29–37 [in Ukrainian].

Andrii Diachun, Assoc. Prof., PhD, **Ivan Hevko**, Prof., DSc., **Oleg Stibailo**,

Roman Leshchuk, Assoc. Prof., PhD, **Roman Komar**, PhD, Assoc. Prof.

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Theoretical Study of the Technological Process of Machining the Outer Edge of Screw Elements of Agricultural Machinery

Despite previous studies of the grinding of the outer edge of screw elements, the dynamics of grinding and sharpening of the outer edge of the screw element were not considered, taking into account the vibrations of the workpiece, tool, elements of basing and fastening of the workpiece, and the tool holder of the machine tool. In addition, previous studies are related to grinding the outer edge of the screw element with a small feed of the through cutter (0.1...0.3 mm/rev), respectively, the length of the working edge of the cutter involved in the cutting process is several times smaller than when grinding the outer edge of the screw element. This leads to a significant increase in the cutting force, and accordingly to the vibrations of the tool and the workpiece. And the instantaneous value of the cutting force and its influence on the dynamic parameters of the process of grinding the outer edge of the screw element determine the quality of the machined surface and require further theoretical and experimental research.

A theoretical study of the technological process of machining the outer edge of screw elements of agricultural machinery has been conducted. During the process of turning and sharpening the outer edge of the screw element, the cutting tools are moved along the axis of rotation of the screw element with a feed equal to the pitch of the turns, the rotational movement of the screw element, geometric parameters, their deviations, and the material of the initial workpiece determine the parameters of the quality of shaping the outer edge of the screw element. In addition, the quality of the machined surface is determined by: the accuracy of the machining system (which includes the tool, workpiece positioning and clamping elements, and the machine tool), variable cutting force parameters, workpiece deformation, tool wear, and the rigidity and vibration resistance of the workpiece machining system elements.

It has been established that increasing the width of the cut part of the screw element's turn and the distance between the top of the sharpened edge of the screw element to the center of the circular cutting plate of the cutter leads to an increase in the area of the part of the screw element's material that is cut, and, accordingly, the cutting force, while increasing the radius of the cutting insert of the cutter leads to a decrease in the value of the specified parameters. A significant increase in the area of the part of the material of the screw element that is cut, and therefore the cutting force, is observed when the distance between the tip of the edge of the screw element that is sharpened approaches to the center of the circular cutting insert of the cutter to the value of the radius of the cutting insert of the cutter with the ratio of the radius of the cutting insert of the cutter to the distance between the tip of the edge of the screw element that is sharpened less than 1.1. At the same time, increasing the radius of the cutter's cutting plate leads to an increase in the sharpening angle of the screw element's edge, and increasing the distance between the tip of the sharpening screw element's edge to the center of the circular cutter's cutting plate leads to a decrease. Therefore, rational ratios of the radius of the cutter's cutting plate to the distance between the tip of the edge of the sharpening screw element to the center of the circular cutter's cutting plate in the cutter design are values from 1.4 to 1.8, which allow reducing the area of the part of the material of the screw element that is cut from 1.54 to 2.21 times, providing a sharpening angle of the edge of the screw element from 47 degrees to 57 degrees. The width of the cut part of the screw element's turn has a minor effect on the angle of sharpening of the screw element's edge. Also, to provide a different angle of sharpening of the edge of the screw element, as well as to change the load on the cutter, the distance between the top of the sharpening edge of the screw element to the center of the circular cutting plate of the cutter must be adjustable.

technological process, research, helical spiral, workpiece, tool holder, machining accuracy, cutting tool, machine tool, feed, element, sharpening, edge, operation

Одержано (Received) 03.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 62-755

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.126-132](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.126-132)

Г. Б. Філімоніхін, проф., д-р техн. наук, Ю. О. Сокальська, Ю. О. Остапчук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: filimonikhin@ukr.net

Модернізація методу коефіцієнтів впливу для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопорного ротора

В статті для підвищення точності визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопорного ротора модернізується метод коефіцієнтів впливу. Модернізований метод враховує усі особливості жорсткого двохопорного ротора. В розрахунках використовує тільки сигнали, зняті з двох одноосьових датчиків вібрацій, та датчику фази. У явному вигляді не розраховуються коефіцієнти впливу, в розрахунках не використовуються величини і місця розташування пробних мас. Це зменшує похибки обчислень, зокрема, викликані асинхронним зняттям даних з датчиків.

ротор, незрівноваженість, балансувальний стенд, аналіз вібрацій, балансування

Постановка проблеми. В рамках загальної проблеми балансування жорстких роторів існує проблема з визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопорного ротора. Випадок жорсткого двохопорного ротора найчастіше зустрічається у техніці. Це єдиний випадок ротора, який дозволяє балансувати ротор на будь-який зручний швидкості обертання. Причому, після балансування зникають оборотні вібрації ротора на будь-яких швидкостях обертання.

Основні методи визначення незрівноваженості ротора побудовані для лінійних систем. Найменшу кількість пусків ротора для цього забезпечує метод коефіцієнтів впливу. Відповідно до методу, для визначення незрівноваженості ротора у k площинах корекції необхідно пробно запустити ротор $(k+1)$ разів.

Стандартна реалізація методу коефіцієнтів впливу однакова для одно-, двох- і більше площинного балансування роторів. Вона не враховує особливостей жорстких двохопорних роторів, що невиправдано ускладнює реалізацію методу, призводить до появи похибок обчислень тощо.

В роботі модернізується метод коефіцієнтів впливу для випадку визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопорного ротора. При цьому враховуються всі особливості розглядуваного ротора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Балансувальні прилади призначені для визначення незрівноваженості мас ротора в одній чи декількох площинах корекції. Основні етапи розвитку балансувальної техніки і відповідної теорії найбільш повно відображені в роботах [1-4]. Основні методи визначення масової незрівноваженості побудовані для лінійних систем. Найменшу кількість пусків ротора для цього забезпечує метод коефіцієнтів впливу [5]. Так, відповідно до методу, для визначення динамічної незрівноваженості (незрівноваженості у двох площинах корекції) жорсткого ротора достатньо провести три пробних пуска (тому цей метод називають ще методом трьох пробних пусків). При балансуванні багатоопорного ротора мінімізують вібрації в його опорах [1-4]. Тому, датчики вібрацій встановлюють на опорах ротора, що ускладнює реалізацію методу.

У випадку жорсткого ротора його незрівноваженість динамічна. Вона має статичну і моментну складові. Динамічна незрівноваженість балансується у двох площинах

корекції на будь-який зручній швидкості обертання ротора. Після динамічного балансування жорсткого двохопрного ротора теоретично зникають будь-які його оборотні вібрації на будь-яких швидкостях обертання. При балансуванні ротора в 1-й, 3-х і більше площинах корекції усуваються вібрації в опорах ротора тільки на певній швидкості чи певних швидкостях обертання ротора. Тому вібрації вимірюються тільки в опорах. Це ускладнює реалізацію методу для таких роторів. У випадку жорсткого двохопрного ротора немає потреби вимірювати вібрації тільки в опорах ротора. Тому виникає можливість модернізувати метод з метою спрощення вимірювання вібрацій в контрольних точках.

З розвитком обчислювальної техніки удосконалюються алгоритми обробки сигналів, що поступають з датчиків вібрацій і фази [6-8]. У випадку аналогових датчиків сигнали у вигляді напружень оцифровуються різними АЦП. При цьому з використанням коефіцієнтів переведення датчиків напруження переводяться у пришвидшення, швидкість чи переміщення. Це ускладнює розрахунки, збільшує час на розрахунки, є джерелом виникнення похибок тощо.

При дослідженні динаміки повітряних і гребних гвинтів виникає задача окремого визначення незрівноваженості мас і аеродинамічної чи гідродинамічної незрівноваженості у вигляді масового еквівалента [9-11]. Для розв'язання цієї задачі не треба контролювати клас точності балансування, не треба переводити напруження у віброшвидкості тощо. Це надає можливість спростити обробку сигналів з датчиків вібрацій шляхом виключення з розрахунків переведення напружень у величини, що характеризують вібрації.

В залежності від АЦП сигнали з датчиків фази і вібрацій можуть зніматися у синхронному і асинхронному режимах. Самі електрична чи обчислювальна системи АЦП можуть давати затримки у оцифруванні сигналів [3,4]. Це впливає на точність визначення коефіцієнтів впливу. Тому виникають питання: чи є потреба обчислювати коефіцієнти впливу у явному вигляді при визначенні незрівноваженості мас; що забезпечує стійкість методу коефіцієнтів впливу при затримці сигналів чи при асинхронній роботі АЦП.

Постановка завдання. Мета роботи – для підвищення точності визначення динамічної незрівноваженості жорсткого ротора модернізувати метод коефіцієнтів впливу. Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання:

- 1) визначити правила розмітки ротора, місця встановлення датчиків вібрацій і датчика фази, тип сигналів, що знімаються з датчиків, алгоритми обробки сигналів;
- 2) модернізувати метод коефіцієнтів впливу шляхом виключення з розрахунків інформації про величини і місця встановлення пробних мас, виключення розрахунків коефіцієнтів впливу тощо;
- 3) розробити віртуальний прилад для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопрного ротора і провести його апробацію.

Виклад основного матеріалу

1.1. Розмітка ротора, розміщення датчиків вібрацій і фази, обробка сигналів. Ротор розглядається як абсолютно жорсткий. У нього повинні бути дві паралельні площини корекції. В цих площинах визначається динамічна незрівноваженість ротора. Незрівноваженість ротора Q_j , у площині корекції $j=1,2$ утворюється точковою масою m_j , встановленою на відстані R_j від подовжньої осі ротора. Задача полягає у визначенні як величин точкових мас, так і місць розташування цих мас на колах радіусів R_j . Для визначення фази коливань і відрахунку нового оберту ротора на нього наноситься нульова мітка.

Для заміру вібрацій використовуються два одноосьових датчика вібрацій. Це можуть бути акселерометри, датчики віброшвидкостей чи вібропереміщень. Датчики можуть бути як аналоговими, так і цифровими, але їх характеристики повинні бути лінійними. Датчики вібрацій розташовуються будь-де, зокрема, біля опор ротора, на

платформі, де встановлений ротор, на корпусі, у якому встановлений ротор тощо. Датчики вібрацій повинні надавати можливість виявляти дві основні моди коливань ротора: від статичної незрівноваженості; від моментної незрівноваженості. Наприклад, міжопорний ротор на двох однакових ізотропних опорах буде здійснювати циліндричну прецесію від статичної незрівноваженості і конічну нутацію від моментної. Датчики повинні надавати можливість виявляти і розрізняти ці форми коливань ротора.

Датчиком фаз може бути датчик, що працює на будь-якому принципі – оптичному, магнітному, індуктивному. На початку нового оберту датчик повинен видавати чіткий сигнал.

Сигнали з датчиків знімаються паралельно чи послідовно з деяким кроком у часі Δt протягом $T=N \cdot \Delta t$ секунд, де N – ціле число. Рекомендується, щоб на один оберт ротора перепадало не менше 72 вимірів показань з датчиків.

У результаті зняття сигналів з датчиків формується таблиця, яка має $(N+1)$ рядків і 3 стовпчика. Перший рядок відповідає моменту часу 0 с, а останній – T с. Перший стовпчик відповідає сигналу з датчика фаз, другий стовпчик – сигналу з другого, а третій – третього датчику вібрацій.

Немає значення як оцифровується той чи інший сигнал. Він може бути заміряним на датчику напруженням, цілим числом від 0 до 2^n у випадку АЦП з n розрядами тощо. Головне, щоб оцифрований сигнал з датчиків вібрацій був прямо пропорційним відповідним пришвидшенням, швидкостям чи переміщенням.

Таблиця сигналів обробляється за певним алгоритмом, наприклад, розробленим в роботі [8]. В результаті визначаються дві характеристики вібрацій у вигляді комплексних чисел

$$\mathbf{V}_j = V_j e^{i\varphi_j}, \quad / j = 1, 2/, \quad (1)$$

де V_j визначає модуль, а φ_j – фазу вібрацій у напрямку датчику вібрацій номер j .

1.2. Алгоритми розрахунків динамічної незрівноваженості. Вібрації у 0-му пробному запуску в двох площинах вимірювання вібрацій $\mathbf{V}0_1, \mathbf{V}0_2$, викликані невідомими незрівноваженими масами $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$:

$$\mathbf{V}0_j = \mathbf{a}_{j1} \mathbf{Q}_1 + \mathbf{a}_{j2} \mathbf{Q}_2, \quad / j = 1, 2/, \quad (2)$$

де $\mathbf{a}_{11}, \mathbf{a}_{12}, \mathbf{a}_{21}, \mathbf{a}_{22}$ – невідомі комплексні коефіцієнти впливу.

Вібрації у 1-му пробному запуску $\mathbf{V}1_1, \mathbf{V}1_2$, викликані невідомими незрівноваженими масами $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ і пробною масою $\mathbf{P}_1$:

$$\mathbf{V}1_j = \mathbf{a}_{j1}(\mathbf{Q}_1 + \mathbf{P}_1) + \mathbf{a}_{j2} \mathbf{Q}_2, \quad / j = 1, 2/. \quad (3)$$

Вібрації у 2-му пробному запуску $\mathbf{V}2_1, \mathbf{V}2_2$, викликані невідомими незрівноваженими масами $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ і пробною масою $\mathbf{P}_2$:

$$\mathbf{V}2_j = \mathbf{a}_{j1} \mathbf{Q}_1 + \mathbf{a}_{j2}(\mathbf{Q}_2 + \mathbf{P}_2), \quad / j = 1, 2/. \quad (4)$$

Будемо шукати коригувальні маси у вигляді:

$$\mathbf{C}_j = -\mathbf{Q}_j = \delta_j \mathbf{P}_j, \quad / j = 1, 2/, \quad (5)$$

де комплексне число δ_j , $/ j = 1, 2/$ у експоненціальній формі:

$$\delta_j = \delta_j e^{i\psi_j}, \quad (6)$$

(i – уявна одиниця) визначає, що коригувальна маса $\mathbf{Q}_j$ більше відповідної пробної маси $\mathbf{P}_j$ у δ_j разів, а кут ψ_j задає на роторі положення незрівноваженої маси $\mathbf{Q}_j$ і відраховується від пробної маси $\mathbf{P}_j$ до незрівноваженої маси $\mathbf{Q}_j$ у напрямку обертання

ротора. Кориговальна маса розміщена на роторі на тому ж радіусі, що і пробна. Вібтрації після балансування:

$$0 = \mathbf{a}_{j1}(\mathbf{Q}_1 + \delta_1 \mathbf{P}_1) + \mathbf{a}_{j2}(\mathbf{Q}_2 + \delta_2 \mathbf{P}_2), \quad / j = 1, 2 /. \quad (7)$$

Отже, одержали 8 рівнянь (2)–(4), (7) для визначення 8 невідомих $\mathbf{a}_{11}, \mathbf{a}_{12}, \mathbf{a}_{21}, \mathbf{a}_{22}, \mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \delta_1, \delta_2$.

Для лінійних пружних систем коефіцієнти впливу повинні бути симетричними ($\mathbf{a}_{12} = \mathbf{a}_{21}$). Не будемо використовувати цю властивість з метою зменшення впливу на точність розрахунків затримки сигналів, асинхронного оцифрування сигналів з датчиків тощо.

Розв'язуємо одержану систему рівнянь.

Формальне визначення незрівноважених мас через коефіцієнти впливу і параметри вібрацій нульового запуску:

$$\mathbf{Q}_1 = (\mathbf{V}0_1 \mathbf{a}_{22} - \mathbf{V}0_2 \mathbf{a}_{12}) / \Delta, \quad \mathbf{Q}_2 = -(\mathbf{V}0_1 \mathbf{a}_{21} - \mathbf{V}0_2 \mathbf{a}_{11}) / \Delta, \quad (8)$$

де

$$\Delta = \mathbf{a}_{11} \mathbf{a}_{22} - \mathbf{a}_{12} \mathbf{a}_{21}. \quad (9)$$

Розв'язок формальний, бо у нас немає коефіцієнтів впливу.

З (3), (4) знаходимо

$$\mathbf{V}2_j - \mathbf{V}0_j = \mathbf{a}_{j2} \mathbf{P}_2, \quad / j = 1, 2 /. \quad (10)$$

Звідси формально визначаємо коефіцієнти впливу

$$\mathbf{a}_{j1} = (\mathbf{V}1_j - \mathbf{V}0_j) / \mathbf{P}_1, \quad \mathbf{a}_{j2} = (\mathbf{V}2_j - \mathbf{V}0_j) / \mathbf{P}_2, \quad / j = 1, 2 /. \quad (10)$$

Розв'язок формальний, бо у нас немає комплексних чисел $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ що характеризують пробні маси $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$.

З (9), (10) знаходимо

$$\Delta = \mathbf{D} / \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2, \quad (11)$$

де

$$\mathbf{D} = \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1 - \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 + \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1 + \mathbf{V}1_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}1_2 \mathbf{V}2_1. \quad (12)$$

З (8), (10), (11) формально знаходимо незрівноважені маси:

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{P}_1 (\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1) / \mathbf{D}, \quad \mathbf{Q}_2 = -\mathbf{P}_2 (\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1) / \mathbf{D}. \quad (13)$$

З (5), (13) знаходимо відносні характеристики коригувальних мас $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$:

$$\delta_1 = -(\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1) / \mathbf{D}, \quad \delta_2 = (\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1) / \mathbf{D}. \quad (14)$$

Відносні величини і відносні положення самих незрівноважених мас $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ задають комплексні числа

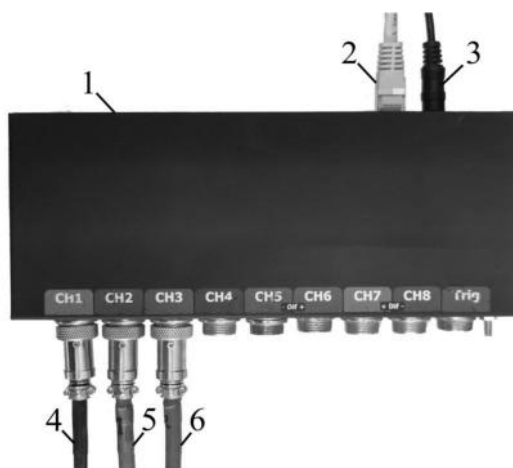
$$\mathbf{d}_1 = \frac{\mathbf{Q}_1}{\mathbf{P}_1} = \frac{\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1}{\mathbf{D}} = -\delta_1, \quad \mathbf{d}_2 = \frac{\mathbf{Q}_2}{\mathbf{P}_2} = -\frac{\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1}{\mathbf{D}} = -\delta_2. \quad (15)$$

Динамічна незрівноваженість ротора розраховується по амплітудам і фазам оборотних коливань величин, знятих з датчиків вібрацій. У явному вигляді не розраховуються коефіцієнти впливу, в розрахунках не використовуються величини і місця розташування пробних мас. Це зменшує похибки обчислень, зокрема, викликані асинхронним зняттям даних з датчиків вібрацій, затримками у контролерах, АЦП тощо.

1.3. Віртуальний прилад для динамічного балансування жорсткого двохопного ротора. Для реалізації і апробації модернізованого методу був створений віртуальний балансувальний прилад. Прилад використовує два аналогових датчика-акселерометра ADXL335 (Analog Devices, Inc., USA), аналоговий тахометр. Аналоговий акселерометр створює напруження, що змінюється від 0 до 3,3 В. Це відповідає зміні вібропришвидження від -3 до +3 g. Аналоговий тахометр більшу

частину одного оберту видає майже постійне напруження $4,8\text{ В}$ за умови, що лазерне світло не попадає на білу стрічку, наклеєну на ротор. При попаданні світла на білу стрічку, воно відбивається і попадає на фоторезистор. Через це напруження падає приблизно до $2,5\text{ В}$. За кожен оберт ротора спостерігається один єдиний явно виражений мінімум.

Аналогові сигнали оцифровує USB осцилограф MT Pro 4.1 (MLab, Україна). Кількість аналогових каналів – 8, розрядність АЦП – 12 бит, максимальна частота дискретизації на канал 500 КГц при використанні 7 чи 8 каналів. Данні з каналів оцифровуються паралельно. USB осцилограф працює з будь-яким сучасним комп'ютером з ОС Windows 7–11. Осцилограф дозволяє обирати частоту і час дискретизації, зберігати оцифровані сигнали у файлі Excel.



1 – USB осцилограф MT Pro 4.1; 2 – мережевий кабель передачі даних на ПК; 3 – кабель живлення;
4 – кабель тахометра; 5 – кабель акселерометра 1; 6 – кабель акселерометра 2

Рисунок 1 – віртуальний прилад для динамічного балансування жорсткого двохопоровного ротора

Джерело: розроблено авторами

Після трьох пробних запусків ротора одержуються три файли Excel з оцифрованими даними. Данні обробляються в програмі MathCad за алгоритмами, описаними в роботі [8]. В результаті для кожного запуску ротора визначаються дві характеристики вібрацій у вигляді комплексних чисел (1).

В першому експерименті балансувався ротор побутового осьового вентилятора з крильчаткою. Сумарна маса $2,7\text{ кг}$. На ротор електродвигуна насаджена крильчатка. Ротор встановлений в корпус двигуна з можливістю обертання. Сам двигун пружно закріплений [10]. Балансування відбулося за 2 цикли. Залишкова незрівноваженість не перевищувала $0,3\text{ г}\cdot\text{мм}$ у кожній площині корекції. При такій незрівноваженості ротора характеристики вібрацій стають не стабільними.

В другому експерименті балансувалася центрифуга побутової пральної машини. Центрифуга насаджена на ротор електродвигуна. Ротор встановлений в корпус двигуна з можливістю обертання. Сам двигун пружно закріплений [11]. Сумарна маса центрифуги і електродвигуна $8,2\text{ кг}$. Балансування відбулося за 2 цикли. Залишкова незрівноваженість не перевищувала $0,8\text{ г}\cdot\text{мм}$ у кожній площині корекції. При такій незрівноваженості центрифуги характеристики вібрацій стають не стабільними.

Висновки

1. Для модернізації методу коефіцієнтів впливу для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого ротора використано те, що тільки у випадку жорсткого ротора його динамічне балансування у двох площинах корекції на певній швидкості

обертання усуває вібрації на всіх швидкостях обертання ротора. Модернізований метод використовує в розрахунках тільки сигнали, зняті з двох одноосьових датчиків вібрацій, та датчику фази. Це дає можливість розширити можливі місця розташування двох одноосьових датчиків вібрацій, визначати незрівноваженість ротора на будь-який зручний швидкості обертання, спростити розмітку ротора до нанесення мітки обертів.

Для зменшення похибок і часу замірів сигналів з датчиків фази і вібрацій запропоновано знімати сигнали «як є», без переводу у пришвидшення, швидкість чи переміщення. Запропоновано по заміряним сигналам визначати їх амплітуди і фази коливань. Це також зменшує час розрахунків і похибки обчислень.

2. Динамічна незрівноваженість ротора розраховується по амплітудам і фазам оборотних коливань величин, знятих з датчиків вібрацій. У явному вигляді не розраховуються коефіцієнти впливу, в розрахунках не використовуються величини і місця розташування пробних мас. Це зменшує похибки обчислень, зокрема, викликані асинхронним зняттям даних з датчиків вібрацій, затримками у контролерах, АЦП тощо.

3. Розробленим віртуальним балансувальним пристроєм балансування роторів на лінійних опорах відбувається за 1, 2 цикли. Після цього залишкова незрівноваженість ротора настільки мала, що характеристики залишкових вібрацій ротора стають не стабільними, тобто змінюються від пуску до пуску ротора. Остаточна незрівноваженість ротора електродвигуна побутового вентилятора масою 2,7 кг не перевищувала 0,3 г·мм у кожній площині корекції. У центрифуги побутової пральної машини, насадженої на вал електродвигуна, сумарної маси 8,2 кг остаточна незрівноваженість не перевищувала 0,8 г·мм.

Список літератури

1. Darlow M. S. Review of Literature on Rotor Balancing. In: *Balancing of High-Speed Machinery. Mechanical Engineering Series*. Springer, New York, NY, 1989. P. 39–52. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3656-6_3
2. Foiles W. C., Allaire P. E., Gunter E. J. Review: Rotor Balancing. *Shock and Vibration*. 1998. Vol. 5, № 5–6. P. 325–336. <https://doi.org/10.1155/1998/648518>
3. Ibraheem A., Ghazaly N., Abd el-Jaber G. Review of Rotor Balancing Techniques. *American Journal of Industrial Engineering*. 2019. Vol. 6, № 1. P. 19–25. URL: <https://www.sciepub.com/ajie/abstract/11311> (дата звернення: 21.04.2025).
4. Li L., Cao S., Li J., Nie R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*. 2021. Vol. 9, № 5: 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
5. Everett L. J. Optimal Two-Plane Balance of Rigid Rotors. *Journal of Sound and Vibration*. 1997. Vol. 208, № 4. P. 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
6. Xu X., Fan P. Rigid Rotor Dynamic Balancing by Two-Plane Correction with the Influence Coefficient Method. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 365–366. P. 211–215. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.211>
7. Фоменко Д. С., Костенко В. Л. Динамічна невідновженість металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорної станції. *Інтегровані технології та енергозбереження. Серія: Інтегровані технології пром-сті*. 2019. № 2. С. 47–56. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43787>
8. Філімоніхін Г. Б., Остапчук Ю. О., Олійніченко Л. С. Практичні способи визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості лопаткового гвинта. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези доп. IV Міжнар. наук.-техн. конф.* (Вінниця, 3–5 черв. 2025 р.). Вінниця, 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/viewFile/24926/20616> (дата звернення: 21.04.2025).
9. Філімоніхін Г. Б., Сокальська Ю. О., Остапчук Ю. О. Метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аеродинамічної незрівноваженості повітряного гвинта. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези доп. IV Міжнар. наук.-техн. конф.* (Вінниця, 3–5 черв. 2025 р.). Вінниця, 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/25137> (дата звернення: 21.04.2025).
10. Філімоніхін Г. Б., Білик Ю. О., Олійніченко Л. С. Стенд для дослідження звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей повітряного гвинта. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф.* (Вінниця, 13–15 трав. 2021 р.). Вінниця, 2021. С. 57–59. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/paper/view/13296> (дата звернення: 21.04.2025).
11. Filimonikhin G., Yatsun V., Matsui A., Olijnichenko L., Pukalov V. Determining experimentally the patterns of the manifestation of the Sommerfeld effect in a ball auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, № 7 (119). P. 96–104. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265578>

References

1. Darlow, M. S. (1989). *Review of literature on rotor balancing*. In *Balancing of High-Speed Machinery* (pp. 39–52). Mechanical Engineering Series. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3656-6_3
2. Foiles, W. C., Allaire, P. E., & Gunter, E. J. (1998). Review: Rotor balancing. *Shock and Vibration*, 5(5–6), 325–336. <https://doi.org/10.1155/1998/648518>
3. Ibraheem, A., Ghazaly, N., & Abd el-Jaber, G. (2019). Review of rotor balancing techniques. *American Journal of Industrial Engineering*, 6(1), 19–25. Retrieved April 21, 2025, from <https://www.sciepub.com/ajie/abstract/11311>
4. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., & Hou, L. (2021). Review of rotor balancing methods. *Machines*, 9(5), 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
5. Everett, L. J. (1997). Optimal two-plane balance of rigid rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 208(4), 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
6. Xu, X., & Fan, P. (2013). Rigid rotor dynamic balancing by two-plane correction with the influence coefficient method. *Applied Mechanics and Materials*, 365–366, 211–215. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.211>
7. Fomenko, D. S., & Kostenko, V. L. (2019). *Dynamic unbalance of metal rotating bodies of gas-compressor units of gas-compressor stations. Integrated Technologies and Energy Saving. Series: Integrated Technologies of Industry*, (2), 47–56 [in Ukrainian]. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43787>
8. Filimonikhin, H. B., Ostapchuk, Yu. O., & Oliinychenko, L. S. (2025). *Practical methods of determining mass and aerodynamic (hydrodynamic) imbalance of a blade propeller*. In *Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference “Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport”* (Vinnytsia, June 3–5, 2025). Vinnytsia [in Ukrainian]. Retrieved April 21, 2025, from <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/viewFile/24926/20616>
9. Filimonikhin, H. B., Sokalska, Yu. O., & Ostapchuk, Yu. O. (2025). *Method of four test runs for determining mass and aerodynamic imbalance of an air propeller*. In *Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference “Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport”* (Vinnytsia, June 3–5, 2025). Vinnytsia [in Ukrainian]. Retrieved April 21, 2025, from <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/25137>
10. Filimonikhin, H. B., Bilyk, Yu. O., & Oliinychenko, L. S. (2021). *Stand for studying ordinary and aerodynamic imbalances of an air propeller*. In *Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference “Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport”* (Vinnytsia, May 13–15, 2021) (pp. 57–59). Vinnytsia [in Ukrainian]. Retrieved April 21, 2025, from <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/paper/view/13296>
11. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Matsui, A., Olijnichenko, L., & Pukalov, V. (2022). Determining experimentally the patterns of the manifestation of the Sommerfeld effect in a ball auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7/119), 96–104. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265578>

Gennadiy Filimonikhin, Prof., DSc., **Yuliia Sokalska**, **Yuliia Ostapchuk**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Modernization of the Influence Coefficient Method for Determining the Dynamic Unbalance of a Rigid Two-support Rotor

The purpose of the work is to modernize the method of influence coefficients to increase the accuracy of determining the dynamic unbalance of a rigid two-support rotor.

According to the modernized method, the rotor is installed on a balancing stand and the amplitudes and phases of the oscillations of the signals recorded from two single-axis vibration sensors during rotor rotation with a constant angular velocity are determined three times. The first time the rotor is rotated without adding test masses. The second time, a test mass is attached to the rotor in the first correction plane. The third time, a test mass is attached to the rotor in the second correction plane. After that, the relative values and relative positions of the unbalanced masses are calculated using complex coefficients in exponential form. The modulus of the complex number determines how many times the unbalanced mass in a certain correction plane is greater than the corresponding test mass. The angle sets the position of the unbalanced mass on the rotor and is counted from the test mass to the unbalanced mass in the direction of rotor rotation. Unbalanced masses are placed on the rotor at the same radius as the test masses.

The modernized method uses in the calculations only the signals taken from two uniaxial vibration sensors and the phase sensor. The influence coefficients are not calculated explicitly. The values and locations of the test masses are not used in the calculations. This reduces the calculation errors, in particular, those caused by asynchronous data collection from the sensors.

rotor, unbalance, balancing stand, vibration analysis, balancing

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 633.1:631.361:004.942 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.133-146](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.133-146)

Е. Б. Алієв, ст. досл., д-р техн. наук, І. М. Білоус

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: aliev@meta.ua, bilous.i.m@dsau.dp.ua

Симуляція процесу руйнування зерна ударним різанням

У статті досліджено вплив конструктивних та кінематичних параметрів нового робочого органу дискового подрібнювача з ударними накладками на процес руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю методом ударного різання. Моделювання проведено із використанням методу дискретних елементів (DEM) у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Встановлено залежності сили руйнування від відстані між накладками, кута їх розміщення та лінійної швидкості руху. Запропоновано інтегральний критерій ефективності, що дозволяє оптимізувати параметри подрібнення для досягнення енергоощадного та продуктивного режиму роботи. Визначено раціональні значення конструктивних параметрів для ефективного подрібнення основних зернових культур.

дисковий подрібнювач, ударні накладки, метод дискретних елементів, Simcenter STAR-CCM+, ударне різання, руйнування зерна, конструктивні параметри, оптимізація, енергоефективність

Постановка проблеми. Основною задачею чисельного моделювання є обґрунтування закономірностей взаємодії компонентів концентрованих кормів з робочими елементами подрібнювача для раціонального вибору геометричних та кінематичних характеристик обладнання. Моделювання (симуляція) спрямовано на уточнення параметрів руйнування досліджуваного зерна кукурудзи, пшениці та ячменю. Отримані аналітичні співвідношення і моделі становлять основу для подальшого планування експериментальних досліджень і оптимізації конструкції подрібнювача.

Для відтворення процесу руйнування зерна в симуляції потрібно детальніше дослідити його основні морфометричні і фізико-механічні (в тому числі реологічні) властивості. Зерно зернових культур є складним біологічним матеріалом, який широко досліджують через його морфологічні та механічні характеристики. Знання геометричних параметрів та механічних властивостей зернівок пшениці, ячменю й кукурудзи має велике значення для агроінженерії і технологій переробки – ці дані використовуються при конструюванні обладнання для очищення, сушіння, зберігання та подрібнення зерна [1–2]. Зокрема, розміри та форма зерна впливають на ефективність сепарації в зерноочисних машинах і на рівномірність прогріву при сушінні, а механічна міцність визначає опір зернівок руйнуванню в процесі збору й переробки [1].

Зернівки різних культур відрізняються розмірами та формою. Пшениця має відносно дрібні овальні зернівки: середня довжина близько 5–7 мм [3], ширина ~2,5–3,5 мм, товщина ~2–3 мм [4]. Типова маса 1000 зернин пшениці становить 30–45 г [5]. Ячмінь формує більш видовжені зернівки: довжиною біля 8–10 мм [3–4] при ширині ~3–4 мм і товщині ~2,5–3 мм [4]. Зерно ячменю зазвичай покрите квітковими плівками (лускою), що надають йому довгастої форми з загостреними кінцями. Кукурудза має найбільше зерно серед цих культур – крупні округло-клиноподібні зернівки довжиною в середньому 9–12 мм, шириною ~7–8 мм і товщиною ~4 мм [6].

Форма зерна часто характеризується показником сферичності або співвідношенням сторін. Сферичність визначають як відношення діаметра еквівалентної сфери до довжини зернівки [5]. Для пшеничного зерна зазвичай становить ~0,57 (тобто ~57%), що вказує на помірно витягнуту форму. У кукурудзи зернівки більш округлі: сферичність близько

0,63 (62–63%) [6]. Натомість ячмінь має значно більш витягнуті, веретеноподібні зернівки – сферичність лише $\sim 0,48$ (близько 48%) [3]. Еквівалентно можна навести співвідношення ширини до довжини зернівки: у кукурудзи воно становить $\sim 0,75$, у пшениці $\sim 0,46$, а в ячменю $\sim 0,37$ [3]. Ці морфометричні параметри підтверджують, що ячмінне зерно є найбільш видовженим (довжина в $\sim 2,5$ рази більша за ширину), пшеничне – овально-витягнуте (довжина в ~ 2 рази більша за ширину), а кукурудзяне – найближче до ізометричного (довжина лише на $\sim 30\%$ перевищує ширину).

Зернівки складаються переважно з міцного ендосперму (внутрішнього крохмалисто-білкового ядра) та зовнішніх оболонок (в тому числі алеїронового шару і плодової/насінневої оболонки у пшениці та кукурудзи, плюс остюкових плівок у ячменю). Механічна поведінка зерна визначається структурою цих компонентів. Модуль пружності (Юнга) зернівок характеризує жорсткість матеріалу ендосперму та оболонок.

При навантаженні зернівки до руйнування визначаються показники міцності на стиск та розтяг, тобто граничні напруження і зусилля, які витримує зерно. Зернівки проявляють характерні властивості крихких матеріалів: вони добре чинять опір стиску, але відносно слабкі на розтяг чи вигин [7].

Вологість зерна є ключовим фактором, що впливає на механічні показники. Зі зростанням вологості модуль пружності та максимальна напруга руйнування помітно зменшуються, зате збільшується пластичність і енергія деформації до руйнування [6, 8–9]. При вологості $>15\%$ зерно пшениці та ячменю стає настільки пластичним, що при ударі виникає менше уламків – це враховують при помелі, попередньо кондиціонуючи зерно до оптимальної вологості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному машинобудуванні широкого застосування набуло проектування технічних систем на основі моделей (Model-Based Systems Engineering, MBSE). Однією з базових концепцій цього підходу є створення віртуальних прототипів об'єктів та випробування їх характеристик у цифровому середовищі ще до фізичного виготовлення. Застосування MBSE дозволяє суттєво зменшити витрати ресурсів, скоротити час розробки нових машин та удосконалення існуючих конструкцій. Проте слід зазначити, що достовірність результатів такого моделювання безпосередньо залежить від точності та повноти вихідних даних, які використовуються для побудови моделей [10].

Для досягнення високої відповідності результатів моделювання реальному фізичному процесу необхідно створити модель зернини, яка буде максимально наближеною до її справжньої геометрії та фізико-механічних властивостей. Таким чином, завдання полягає не лише у правильному геометричному відтворенні форми об'єкта, але й у точному визначенні характеристик матеріалу.

Руйнування зерна може бути викликане як зовнішніми, так і внутрішніми чинниками. До зовнішніх відносять конструктивно-технологічні параметри обладнання для обробки, до внутрішніх – фізико-механічні властивості самого зерна, які визначаються його анатомічною структурою, текстурою та ступенем зрілості. Дослідження механічних властивостей зерна [11] свідчать, що текстура та структура клітин суттєво впливає на його механічні характеристики.

Метод дискретних елементів (DEM) довів свою ефективність у прогнозуванні пошкоджень зерна в промислових системах обробки. Експериментальні дослідження показали, що ступінь пошкодження зерна має сильну кореляцію з умовами технологічної обробки. Моделювання в середовищі DEM дозволяє оптимізувати технологічні параметри обладнання, що призводить до підвищення точності прогнозування процесів руйнування зерна [12]. Крім того, метод DEM широко використовується для аналізу поведінки частинок, для яких традиційними

експериментальними методами важко визначити дію перехідних сил або процеси розсіювання енергії.

Точність моделювання методом дискретних елементів значною мірою залежить від правильної побудови вхідної моделі, зокрема від її геометричної форми та фізико-механічних властивостей матеріалу [13]. Найбільш розповсюдженим підходом до відтворення складної геометрії зернин є метод агрегації сфер, який передбачає об'єднання кількох перекриваючих сфер для наближеного відтворення форми об'єкта [14–15]. Такий підхід був успішно застосований для моделювання зернин гороху [16], рису [17], сої [18].

Постановка завдання. Провести чисельне моделювання процесу подрібнення концентрованих кормів та встановити вплив фізико-механічних властивостей зерна, його орієнтації та параметрів дискового подрібнювача на силу руйнування при ударному різанні.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи отримані результати вимірювань і базуючись на огляді сучасних досліджень з моделювання біоматеріалів у середовищі Simcenter STAR-CCM+ [19–20], було створено тривимірні багатосферні моделі зернин кукурудзи, пшениці і ячменю методом агрегації сфер (рис. 1). Такий підхід забезпечує максимально точне відтворення форми зерна при збереженні оптимальної обчислювальної складності для подальших чисельних експериментів.

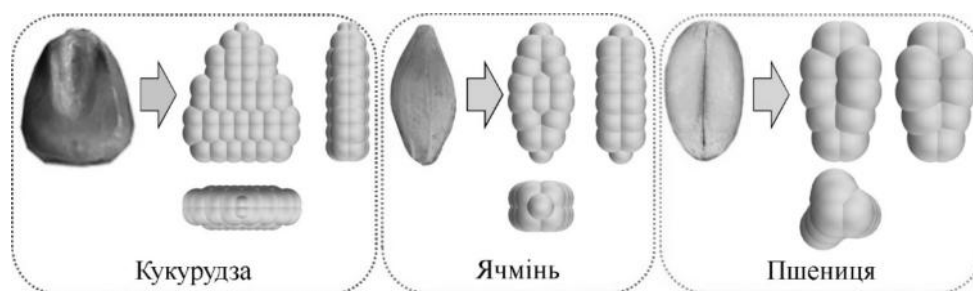


Рисунок 1 – Тривимірні моделі багатосферних зернин кукурудзи, ячменю та пшениці
Джерело: розроблено авторами

Для опису взаємодії між елементами моделі застосували контактну модель Герца–Міндліна, яка дозволяє моделювати пружно-пластичну деформацію тіл при їхньому локальному контакті. Контактна модель Герца–Міндліна є фундаментальним елементом фізико-математичного апарату методу дискретних елементів (DEM), що дозволяє описати сили взаємодії між двома тілами (наприклад, зерниною кукурудзи та пуансоном) при наявності контакту. Ця модель включає як нормальні сили стиску (модель Герца), так і тангенціальні сили зсуву (модель Міндліна), доповнюючи їх дисипативними компонентами і критерієм тертя Кулона. У випадку моделювання зернин у середовищі Simcenter STAR-CCM+ саме ця модель забезпечує адекватне відтворення фізичних процесів пружного стиску, зсуву і кочення.

Модель контактної сили багатосферних зернин представлено на рис. 2.

Нормальна $F_{aZ-P-bY}^n$ і тангенціальна $F_{aZ-P-bY}^t$ сили контактної взаємодії сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P задані як:

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^n} = \left(\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_{aZ-P-bY}^{\frac{3}{2}}, -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_{aZ-P-bY}^n \right) \overline{n_{aZ-P-bY}}, \quad (1)$$

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^t} = -\min \left(S_t \overline{\xi_{aZ-P-bY}} + 2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_{aZ-P-bY}^t}, \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \frac{\overline{\xi_{aZ-P-bY}}}{\left| \overline{\xi_{aZ-P-bY}} \right|} \right), \quad (2)$$

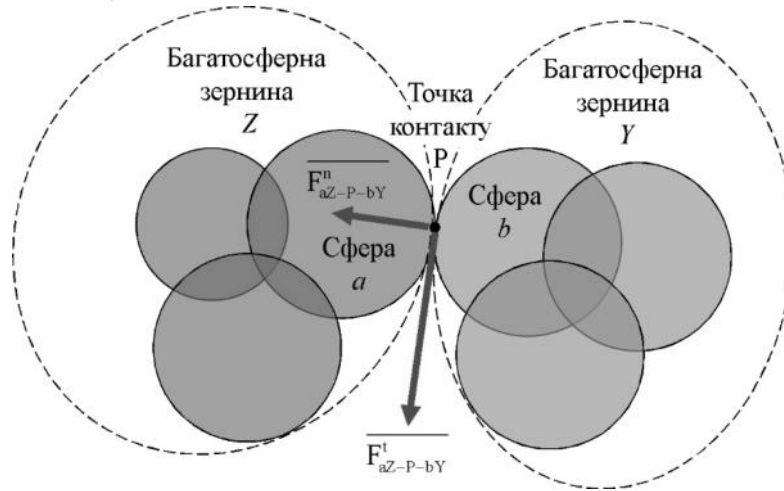


Рисунок 2 – Модель контактної сили багатосферних зернин

Джерело: розроблено авторами

де E^* – еквівалентний модуль Юнга, R^* – еквівалентний радіус:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_{aZ}} + \frac{1}{R_{bY}}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_Z^2)}{E_Z} + \frac{(1-\nu_Y^2)}{E_Y}, \quad (4)$$

R_{aZ} , R_{bY} – радіус кожної сфери в контакті; E_Z , E_Y – модуль Юнга; ν_Z , ν_Y – коефіцієнт Пуассона; $\delta_{aZ-P-bY}$ – нормальне перекриття сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P ; β – коефіцієнт демпфування:

$$\beta = \frac{-\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}, \quad (5)$$

e – коефіцієнт відновлення; S_n – нормальна жорсткість:

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_{aZ-P-bY}}, \quad (6)$$

m^* – еквівалентна маса:

$$m^* = \left(\frac{1}{m_{aZ}} + \frac{1}{m_{bY}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$v_{aZ-P-bY}^n$ – нормальна складова відносної швидкості; $\overline{n_{aZ-P-bY}}$ – вектор нормальної одиниці контакту, який спрямований від точки контакту P до центру часткової сфери a в багатосферній зернині Z ; S_t – тангенціальної жорсткості:

$$S_t = 8W^* \sqrt{R^* \delta_{aZ-P-bY}}, \quad (8)$$

W^* – еквівалентний модуль зсуву

$$W^* = \frac{1}{2(2-\nu_Z)(1+\nu_Z)/E_Z + 2(2-\nu_Y)(1+\nu_Y)/E_Y}, \quad (9)$$

$\overline{\xi_{aZ-P-bY}}$ – сумарне тангенціальне зміщення часткової сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P ; $\overline{v_{aZ-P-bY}^t}$ – тангенціальна складова відносної швидкості; μ_r – це коефіцієнт статичного тертя.

Сили і моменти, що діють на багатосферну частинку z , відповідно виражаються як:

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^n} = \sum_W \sum_V \left(\overline{F_{aZ-P-bY}^n} + \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right), \quad (10)$$

$$\overline{M_{aZ-P-bY}} = \sum_W \sum_V \left(\left(\overline{x_P} - \overline{x_Z} \right) \times \overline{F_{aZ-P-bY}^t} - \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \left| \overline{x_P} - \overline{x_Z} \right| \overline{\omega_Z} \right), \quad (11)$$

де V і W – номери частинних сфер і точок дотику відповідно; $\overline{x_P}$ – вектор положення точки дотику P ; $\overline{x_Z}$ – вектор положення центру частинки Z ; $\overline{\omega_Z}$ – вектор кутової швидкості багатосферної частинки Z .

Зв'язування частинок використовується для розширення моделі частинок до більш складних (деформівних) форм або структур. Модель скупчення частинок (Particle Clumps Model) використовується для створення груп частинок, які представляють складну форму. У цій моделі застосовується модель зв'язаних частинок, у якій окремі частинки зберігають свою індивідуальність і з'єднані еластично деформівними зв'язками. Додавання моделі пошкодження дозволяє моделювати розтріскування та фрагментацію скупчення зі звільненням складових частинок.

Модель зв'язування частинок використовується як у моделі паралельних зв'язків, так і в моделі зв'язаних частинок (скупчень). У моделі паралельних зв'язків зв'язування частинок використовується для опису взаємодій між складовими частинками, а також для моделювання еластичних зіткнень між частинками відповідно до обраної користувачем моделі еластичного контакту. Модель зв'язаних частинок (Clumps) використовує лише модель зв'язування частинок.

Модель зв'язування частинок моделює кумулятивне пошкодження зв'язків. Якщо взаємодія призводить до пошкодження, але не до повного руйнування, рівень цього пошкодження враховується шляхом зменшення міцності зв'язку. Для проведення симуляції подрібнення зерна прийнята проста модель руйнування зв'язків (Simple Failure Model Reference), які миттєво руйнуються під навантаженням. Якщо між частинками (сферами зернини) виникають розтягувальні або зсувні напруження, що перевищують допустимі межі, зв'язок руйнується, і частинки розділяються. Після цього взаємодія частинок при зіткненні визначається іншими обраними моделями міжфазної взаємодії.

Зв'язок між частинками (сферами зернини) руйнується, якщо розтягувальне або зсувне напруження в ньому перевищує одне з заданих користувачем граничних значень.

Зв'язок руйнується, якщо:

$$W_{n-m} > W_{n-max} \text{ або } W_{t-m} > W_{t-max}, \quad (12)$$

де W_{n-max} – максимальне напруження розтягу, яке допускається без руйнування з'єднання; W_{t-max} – максимальне зсувне напруження, яке допускається без руйнування зв'язку. Для подальших розрахунків приймаємо, що $W_{n-max} = W_{t-max} = W$.

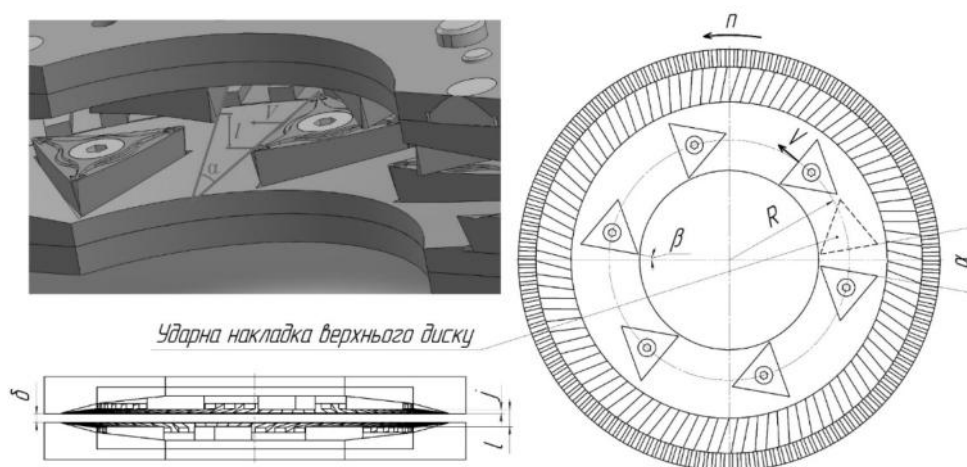
Граничні значення напружень розраховуються на основі теорії балок таким чином:

$$W_{n-m} = - \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| / A^* + \left| \left(\overline{x_P} - \overline{x_Z} \right) \times \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right| R^* / I^*, \quad (13)$$

$$W_{t-m} = \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right| / A^* + \left| \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \left| \overline{x_P} - \overline{x_Z} \right| \overline{\omega_Z} \right| R^* / J^*, \quad (14)$$

де $A^* = \pi(R^*)^2$, $I^* = \pi(R^*)^4/4$, $J^* = \pi(R^*)^4/2$.

Враховуючи особливості конструктивної конфігурації запропонованого нового робочого органу дискового подрібнювача (рис. 3), виникла необхідність дослідити вплив додаткових факторів на силу руйнування зерна при його ударному різанні. Зокрема, оскільки ключову роль у процесі подрібнення виконують ударні накладки, було доцільне вивчення їх впливу на руйнування зернового матеріалу. Для цього в рамках чисельного експерименту було обрано три варійовані фактори, що найбільш повно характеризують кінематику та геометрію взаємодії зерна з ударними елементами удосконаленого дискового подрібнювача (рис. 3): відстань між ударними накладками l , кут між накладками α ; лінійна швидкість руху накладки V . Діапазони варіювання факторів були обрані з наступних міркувань: відстань між ударними накладками l (1,0 мм, 1,5 мм, 2,0 мм) – у відповідності до геометричних розмірів зернин, щоб забезпечити можливість контакту з окремими зернинами без надлишкового скупчення або прослизання; кут між ударними накладками α (10°, 35°, 60°) – з урахуванням забезпечення оптимального режиму подрібнення та рівномірного розподілу ударних навантажень по траєкторії руху; швидкість руху ударної накладки V (4,72 м/с, 7,07 м/с, 9,42 м/с) – згідно частот обертання диска дискового подрібнювача (1500 об/хв, 2250 об/хв, 3000 об/хв) і радіуса розташування накладки (30 мм), що визначає кінетичну енергію удару, яка передається зернині та безпосередньо впливає на ефективність руйнування її оболонки. Дослідження здійснювали відповідно до плану трьохфакторного повного факторного експерименту з трьома рівнями варіювання кожного фактору.



l – відстань між ударними накладками; α – кут між ударними накладками; V – швидкість руху ударної накладки; n – частота обертання диска; R – радіус встановлення накладки; δ – модульний зазор між дисками; l – відстань від накладки до краю диска; β – кут встановлення ударних накладок

Рисунок 3 – Схема обраних факторів для чисельного моделювання

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до наведеного фізико-математичного апарату симуляції процесу руйнування зерна, всі параметри моделі поділяються на параметри властивостей матеріалу та параметри взаємодії, які наведені в табл. 2.

На рисунку 4 наведено кілька прикладів розвитку процесу руйнування зернини ударним різанням, зафіксованих під час чисельного моделювання в середовищі Simcenter STAR-CCM+. Скріншоти ілюструють різні варіанти положення зернини, їх

моделей та досліджуваних параметрів. У середовищі Simcenter STAR-CCM+ на основі розроблених DEM-моделей зернин було проведено серію віртуальних досліджень процесу руйнування ударним різанням, за якими визначалась залежність зусилля від деформації зернини. Приклад такої залежності представлений на рис. 5. Перший максимум залежності і будемо вважати силою руйнування зернини ударним різанням F.

Отримані в результаті віртуального повнофакторного експерименту було оброблено з використанням хмарного обчислювального середовища Wolfram Cloud, що дало змогу реалізувати ефективну математичну обробку великого масиву симуляційних результатів.

У результаті побудовано рівняння регресії в закодованому вигляді, які описують залежність сили руйнування зернини кукурудзи ударним різанням від варійованих факторів.

Таблиця 2 – Параметри симуляції DEM

Матеріали / взаємодія	Параметри	Значення
Кукурудза 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,48 [10] 10,1 [10] 1300 [18] 0,37 [21] 0,2 [22] 2,4 [10] 2,4 [10]
Пшениця 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,5 [10] 21,2 [10] 1320 [18] 0,37 [23] 0,2 [23] 2,2 [10] 2,2 [10]
Ячмінь 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,32 [10] 39,2 [10] 1250 [18] 0,37 [24] 0,2 [24] 3,0 [10] 3,0 [10]
Стінка (сталь)	Коефіцієнт Пуассона Модуль зсуву, Па Щільність, кг/м ³	0,3 [25] $7,9 \times 10^{10}$ [25] 7800 [25]
Кукурудза та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,5 [18] 0,48 [26] 0,05 [18]
Пшениця та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,4 [18] 0,554 [27] 0,05 [16]
Ячмінь та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,4 [18] 0,51 [18] 0,05 [18]

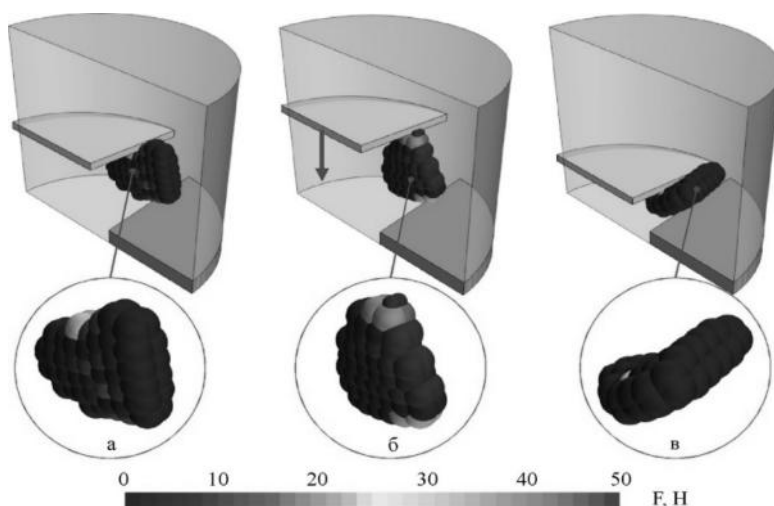


Рисунок 4 – Приклад симуляції руйнування зернини кукурудзи ударним різанням у положенні на бічній поверхні (а), вертикальному (б) та горизонтальному (в)

Джерело: розроблено авторами

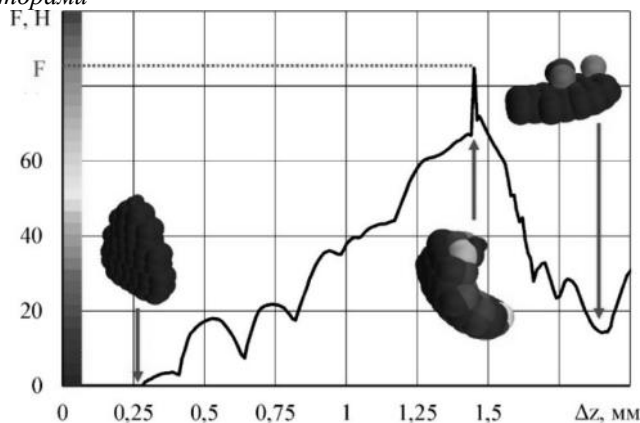


Рисунок 5 – Приклад динаміки зміни зусилля при руйнуванні зернини кукурудзи ударним різанням у вертикальному положенні

Джерело: розроблено авторами

Для кукурудзи:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^c = 1472,26 - 337,334l - 42,7824\alpha + 5,90499l\alpha + 0,35192\alpha^2; \quad (15)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^c = 506,258 - 127,277l - 9,46527\alpha + 2,05933l\alpha + 0,0399371\alpha^2; \quad (16)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^c = 159,716 - 5,55777V + 1,11047V^2 - 1,74888\alpha - 0,189944V\alpha + 0,00982222\alpha^2. \quad (17)$$

Для пшениці:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^w = 133,741 - 42,5066l - 0,193652\alpha + 0,657696l\alpha - 0,0289088\alpha^2; \quad (18)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^w = 178,8 - 19,0944l - 1,90109\alpha; \quad (19)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^w = 38,8957 + 4,4368V - 0,391895\alpha - 0,0876715V\alpha. \quad (20)$$

Для ячменю:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^b = 56,9373 - 11,7724l + 0,333859\alpha - 0,0147722\alpha^2; \quad (21)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^b = 105,222 - 11,0936l - 1,13344\alpha; \quad (22)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^b = 27,4718 + 2,90126V - 0,284666\alpha - 0,057903V\alpha. \quad (23)$$

Графічна інтерпретація залежностей (15)–(23) наведена на рис. 6–8.

Аналіз отриманих результатів віртуального моделювання дозволив визначити ступінь впливу кожного з досліджуваних факторів на силу руйнування зерна кукурудзи. Найбільш впливовим чинником виявився кут між ударними накладками. Спостерігається чітка зворотна залежність: зі збільшенням кута відбувається зменшення сили, необхідної для руйнування зернини. Це пояснюється зменшенням компоненти нормального навантаження, яка передається на оболонку зерна при збільшенні кута взаємного розташування накладок. З фізичної точки зору, при малому куті ударні накладки спрямовані більш фронтально до зернини, забезпечуючи вищий рівень концентрованого механічного впливу у напрямку, перпендикулярному до оболонки. Це призводить до швидшого досягнення граничного стану напружень у зоні контакту та ініціювання руйнування.

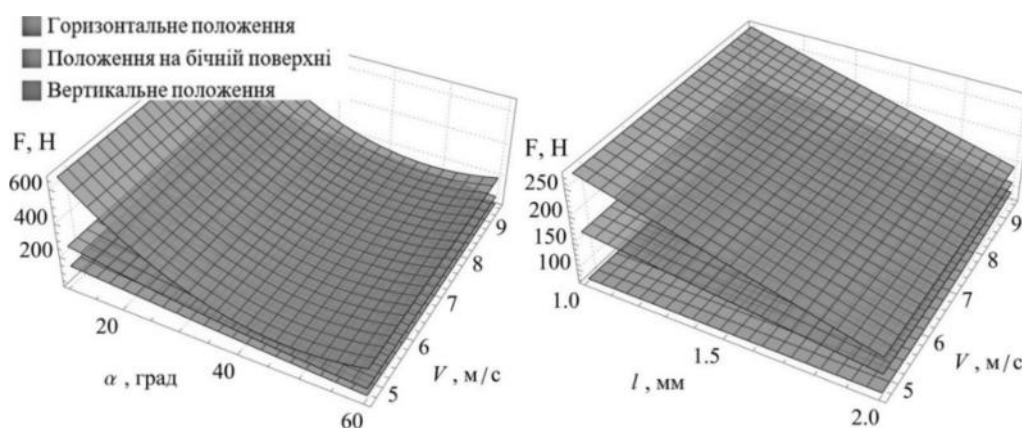


Рисунок 6 – Залежність сили руйнування зерна кукурудзи при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні
Джерело: розроблено авторами

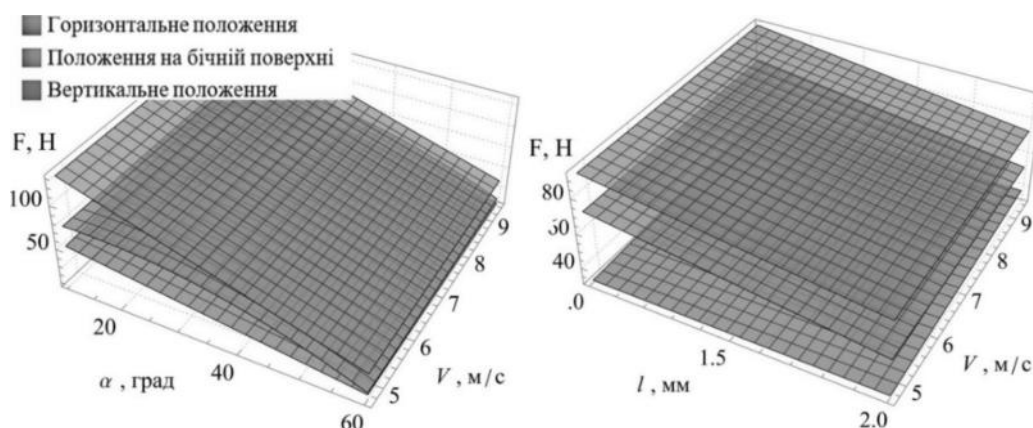


Рисунок 7 – Залежність сили руйнування зерна пшениці при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні
Джерело: розроблено авторами

Відстань між ударними елементами має помірний вплив порівняно з кутом. Встановлено, що зменшення відстані сприяє зростанню сили руйнування зерна. Це зумовлено тим, що при меншій відстані ударні накладки створюють сприятливіші умови для ефективного стискання оболонки, що пришвидшує розвиток локальних деформацій і формування тріщини. З фізичної точки зору, при зменшенні відстані між елементами зернина зазнає впливу двох майже одночасних ударів у ближчих зонах, що сприяє інтенсивнішому розподілу напружень у поперечному перерізі оболонки, прискорюючи процес накопичення пластичних деформацій та запуску механізмів зминання. Найбільш виражений ефект спостерігається у горизонтальному та бічному положеннях, де механізм руйнування реалізується переважно шляхом локального зминання та зсуву. У вертикальному положенні вплив відстані є менш суттєвим, оскільки навантаження діє вздовж найміцнішої геометричної осі.

Швидкість ударної накладки виявилася найменш впливовим фактором серед досліджуваних. Водночас, зі зростанням швидкості спостерігається тенденція до підвищення сили руйнування, особливо у вертикальному положенні зернина, де удар передається вздовж поздовжньої осі. У таких умовах кінетична енергія, яку передає накладка, ефективно концентрується в центральній частині зерна, сприяючи утворенню внутрішніх мікротріщин та підвищенню рівня напружень у структурі. З фізичної точки зору, швидкість впливає на імпульс та енергію удару: чим вища швидкість, тим більша миттєва сила взаємодії, що призводить до швидшого перевищення межі пружності матеріалу оболонки. Проте через короткий час взаємодії і швидку релаксацію напружень, ефект не є лінійним і проявляється лише в окремих просторових положеннях зернина, де ударна хвиля ефективніше передається вглиб структури.

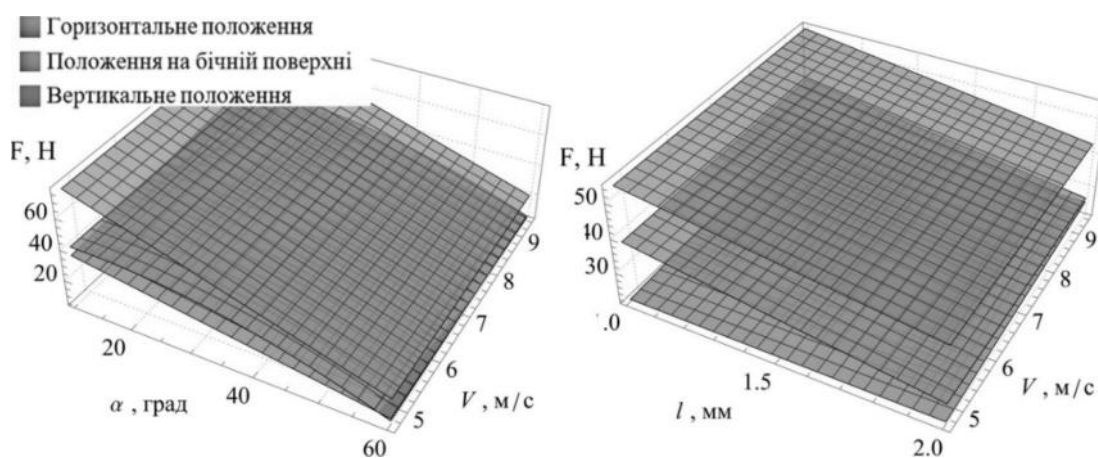


Рисунок 8 – Залежність сили руйнування зерна ячменю при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні
Джерело: розроблено авторами

Для комплексної оцінки було введено інтегральний критерій ефективності:

$$\Theta(l, \alpha, V) = \frac{F_x - F_{x\min}}{F_{x\max} - F_{x\min}} \cdot \frac{F_y - F_{y\min}}{F_{y\max} - F_{y\min}} \cdot \frac{F_z - F_{z\min}}{F_{z\max} - F_{z\min}} \cdot \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \cdot \frac{l_{\max} - l}{l_{\max} - l_{\min}} \rightarrow \min, \quad (24)$$

згідно якого повинна забезпечуватись умова мінімізації сили при найбільшій відстані між ударними накладками l (висока продуктивність процесу подрібнення) і найменшій швидкості руху ударної накладки V (менша витрати кінетичної енергії процесу подрібнення).

Вирішуючи спільно рівняння (24) разом із (15)–(23) в середовищі Wolfram Cloud отримуємо раціональні значення процесу подрібнення які наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Раціональні параметри процесу подрібнення з використанням розробленого робочого органу, отримані при чисельному моделюванні

Культура	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
Відстань між ударними накладками l , мм	1,78	1,68	1,79
Кут між ударними накладками α , °	43,8	43,6	50,7
Швидкість руху ударної накладки V , м/с	5,86	4,72	5,26
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_x , Н	58,8	24,6	12,9
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_y , Н	94,6	65,3	25,6
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_z , Н	117,1	48,2	12,4
Частота обертання диска $n = 60V/(2\pi R)$, об/хв, де $R = 0,03$ м – радіус встановлення накладки, мм.	1865	1503	1676
Модульний зазор між дисками $\delta = l - 2t$, мм, де $t = 0,5$ мм – відстань від накладки до краю диска, мм	0,78	0,68	0,79
Кут встановлення ударних накладок $\beta = \alpha/2$, °	21,9	21,8	25,3

Висновки. Враховуючи специфіку конструкції нового робочого органу дискового подрібнювача з ударними накладками, досліджено вплив трьох ключових факторів (відстані між ударними накладками l , кута між ними α та лінійної швидкості руху накладки V) шляхом чисельного моделювання процесу руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю способом ударного різання із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Встановлені закономірності сили руйнування зерна кукурудзи, пшениці і ячменя у трьох положеннях при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V . Виявлені закономірності дозволяють дати кількісну оцінку та глибше фізичне розуміння процесів руйнування оболонки зерна в умовах ударного різання. Це є підґрунтям для оптимізації конструктивних параметрів подрібнювача, що забезпечить підвищення ефективності та енергоощадності процесу подрібнення різних типів зернового матеріалу. Для комплексної оцінки процесу подрібнення зернових культур було запропоновано інтегральний критерій ефективності, що забезпечує мінімізацію сили руйнування при максимальній відстані між ударними накладками та мінімальній швидкості їх руху. Це дозволяє досягти високої продуктивності процесу з одночасним зниженням витрат кінетичної енергії. Встановлені раціональні параметри подрібнення для основних зернових культур – кукурудзи, пшениці та ячменю. Аналіз отриманих результатів підтверджує, що параметри процесу (відстань між накладками $l = 1,68$ – $1,79$ мм, кути їх встановлення $\beta = 21,8$ – $25,3$ °, швидкість руху $V = 4,72$ – $5,86$ м/с, частота обертання диска $n = 1503$ – 1865 об/хв, модульний зазор $\delta = 0,68$ – $0,79$ мм) відображають фізико-механічні особливості кожної культури.

Список літератури

1. Gao P., Tian S., Xue X., Lu J. Determination methods and influencing factors of grain mechanical properties. *Journal of Food Quality*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1155/2024/3407485.

2. Осокіна Н. М., Костецька К. В., Герасимчук О. П. Physical and mechanical properties and quality indicators of grain of cereal cultures. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. 2023. Т. 103, № 1. С. 292–307. DOI: 10.32782/2415-8240-2023-103-1-292-307.
3. Tavakoli M., Tavakoli H., Rajabipour A., Ahmadi H., Gharib-Zahedi S. M. T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2, № 4. P. 84–91. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091.
4. Sologubik C., Campañone L., Pagano A., Gely M. Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*. 2012. Vol. 43. P. 762–767. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.08.019.
5. Firatligil-Durmuş E., Sýkorová A., Šárka E., Bubník Z., Schejbal M., Přihoda J. Geometric parameters of wheat grain determined by image analysis and FEM approach. *Cereal Research Communications*. 2010. Vol. 38, № 1. P. 122–133. DOI: 10.1556/crc.38.2010.1.13.
6. Seifi M. R., Alimardani R. The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science*. 2010. Vol. 2, № 4. P. 125–134. DOI: 10.5539/jas.v2n4p125.
7. Coşkun M. B., Yalçın İ., Özarslan C. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.). *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 74, № 4. P. 523–528. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.039.
8. Molenda M., Stasiak M. Determination of the elastic constants of cereal grains in uniaxial compression test. *International Agrophysics*. 2002. Vol. 16, № 1. P. 61–65.
9. Zewdu A., Solomon W. Moisture-dependent physical properties of TEF seed. *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 96, № 1. P. 57–63. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2006.09.008.
10. Дудін В. Ю., Білоус І. М. Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Т. 10, № 41, ч. 2. С. 123–130. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130.
11. Kubík L., Božíková M., Kažimírová V. Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24, № 4. P. 202–208. DOI: 10.2478/ata-2021-0033.
12. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: *Аграрна наука*, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
13. Zhong J., Tao L., Li S., Zhang B., Wang J., He Y. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 203. P. 107428. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107428.
14. Liu Z., Ma H., Zhao Y. Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*. 2021. Vol. 390. P. 34–49. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.05.065.
15. Kruggel-Emden H., Rickelt S., Wirtz S., Scherer V. A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*. 2008. Vol. 188, № 2. P. 153–165. DOI: 10.1016/j.powtec.2008.04.037.
16. Wiącek J., Molenda M., Horabik J., Ooi J. Y. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: experimental and DEM modeling. *Powder Technology*. 2012. Vol. 217. P. 435–442. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.10.060.
17. Markauskas D., Kačianauskas R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*. 2010. Vol. 13, № 2. P. 143–148. DOI: 10.1007/s10035-010-0196-5.
18. Boac J. M., Casada M. E., Maghirang R. G., Harner J. P. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*. 2010. Vol. 53, № 4. P. 1201–1216. DOI: 10.13031/2013.32577.
19. Basiouny M., El-Yamani A. Performance evaluation of two different hammer mills for grinding corn cobs. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 7, № 1. P. 77–87. DOI: 10.21608/jssae.2016.39322.
20. Dibner J., Richards J. The digestive system: challenges and opportunities. *The Journal of Applied Poultry Research*. 2004. Vol. 13, № 1. P. 86–93. DOI: 10.1093/japr/13.1.86.
21. Wang L., Zhou W., Ding Z., Li X., Zhang C. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*. 2015. Vol. 284. P. 187–194. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.042.
22. Markauskas D., Ramírez-Gómez Á., Kačianauskas R., Zdancevičius E. Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. Vol. 118. P. 247–258. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.004.
23. Ramaj I., Romuli S., Schock S., Müller J. Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. ‘Pionier’ during compressive loading. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 242. P. 123–139. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005.

24. Molenda M., Horabik J. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. In: Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. Eds. Horabik J., Laskowski J. Lublin : Institute of Agrophysics PAS, 2005. 146 p.
25. AZoM. AISI 1026 Carbon Steel (UNS G10260). URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583> (дата звернення: 05.10.2022).
26. Boac J., Casada M., Pordesimo L., Petingco M., Maghirang R., Harner J. Evaluation of particle models of corn kernels for discrete element method simulation of shelled corn mass flow. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. P. 100197. DOI: 10.1016/j.atech.2023.100197.
27. Wang X., Wu W., Jia H. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*. 2023. Vol. 11, № 12. P. 7751–7764. DOI: 10.1002/fsn3.3693.

References

1. Gao, P., Tian, S., Xue, X., & Lu, J. (2024). Determination methods and influencing factors of grain mechanical properties. *Journal of Food Quality*, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2024/3407485>.
2. Osokina, N. M., Kostetska, K. V., & Herasymchuk, O. P. (2023). *Physical and mechanical properties and quality indicators of grain of cereal cultures. Collection of Scientific Papers of Uman NUH*, 103(1), 292–307 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-292-307>.
3. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H., & Gharib-Zahedi, S. M. T. (2009). Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2(4), 84–91. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091>
4. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., & Gely, M. (2012). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43, 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.019>.
5. Firatligil-Durmuş, E., Sýkorová, A., Šárka, E., Bubník, Z., Schejbal, M., & Přihoda, J. (2010). Geometric parameters of wheat grain determined by image analysis and FEM approach. *Cereal Research Communications*, 38(1), 122–133. <https://doi.org/10.1556/crc.38.2010.1.13>.
6. Seifi, M. R., & Alimardani, R. (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science*, 2(4), 125–134. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n4p125>.
7. Coşkun, M. B., Yalçın, İ., & Özarslan, C. (2005). Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.). *Journal of Food Engineering*, 74(4), 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.039>.
8. Molenda, M., & Stasiak, M. (2002). Determination of the elastic constants of cereal grains in uniaxial compression test. *International Agrophysics*, 16(1), 61–65.
9. Zewdu, A., & Solomon, W. (2006). Moisture-dependent physical properties of TEF seed. *Biosystems Engineering*, 96(1), 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.09.008>.
10. Dudin, V. Yu., & Bilous, I. M. (2024). *Study of the process of corn grain destruction using digital models. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41/2), 123–130 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130).
11. Kubík, L., Božíková, M., & Kažimírová, V. (2021). Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 24(4), 202–208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
12. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes: Textbook*. Kyiv: Agrarian Science [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>.
13. Zhong, J., Tao, L., Li, S., Zhang, B., Wang, J., & He, Y. (2022). Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>.
14. Liu, Z., Ma, H., & Zhao, Y. (2021). Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*, 390, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>.
15. Kruggel-Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2008). A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*, 188(2), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>.
16. Wiącek, J., Molenda, M., Horabik, J., & Ooi, J. Y. (2012). Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: experimental and DEM modeling. *Powder Technology*, 217, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>.
17. Markauskas, D., & Kačianauskas, R. (2010). Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 13(2), 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>

18. Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., & Harner, J. P. (2010). Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1201–1216. <https://doi.org/10.13031/2013.32577>.
19. Basiouny, M., & El-Yamani, A. (2016). Performance evaluation of two different hammer mills for grinding corn cobs. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 7(1), 77–87. <https://doi.org/10.21608/jssae.2016.39322>.
20. Dibner, J., & Richards, J. (2004). The digestive system: Challenges and opportunities. *The Journal of Applied Poultry Research*, 13(1), 86–93. <https://doi.org/10.1093/japr/13.1.86>
21. Wang, L., Zhou, W., Ding, Z., Li, X., & Zhang, C. (2015). Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*, 284, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>.
22. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., & Zdancevičius, E. (2015). Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>.
23. Ramaj, I., Romuli, S., Schock, S., & Müller, J. (2024). Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. 'Pionier' during compressive loading. *Biosystems Engineering*, 242, 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005>.
24. Molenda, M., & Horabik, J. (2005). Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. In J. Horabik & J. Laskowski (Eds.), *Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling* (p. 146). Lublin: Institute of Agrophysics PAS.
25. AZoM. (n.d.). *AISI 1026 Carbon Steel (UNS G10260)*. Retrieved October 5, 2022, from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583>.
26. Boac, J., Casada, M., Pordesimo, L., Petingco, M., Maghirang, R., & Harner, J. (2023). Evaluation of particle models of corn kernels for discrete element method simulation of shelled corn mass flow. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100197>.
27. Wang, X., Wu, W., & Jia, H. (2023). Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*, 11(12), 7751–7764. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3693>.

Elchyn Aliiev, Sr. Researcher, DSc., Illia Bilous

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Simulation of the Grain Destruction Process by Impact Cutting

The aim of the research is to perform numerical modeling of the concentrated feed grinding process and to determine the influence of the physical and mechanical properties of the grain, its orientation, and the parameters of the disc crusher on the fracture force during impact cutting.

Considering the specific design of the new working unit of the disc crusher with impact inserts, the influence of three key factors – distance between impact inserts (l), angle between them (α), and the linear velocity of insert motion (V) – was investigated through numerical simulation of the grain fracture process for corn, wheat, and barley using the discrete element method (DEM) in the Simcenter STAR-CCM+ environment. The patterns of fracture force for corn, wheat, and barley grains under three orientations during impact cutting were established depending on the distance between inserts, the angle between them, and the linear velocity.

The identified patterns provide a quantitative assessment and a deeper physical understanding of the grain shell destruction processes under impact cutting conditions. This serves as a basis for optimizing the design parameters of the crusher to enhance the efficiency and energy savings in processing different types of grain materials.

To comprehensively evaluate the grain grinding process, an integral efficiency criterion was proposed, aiming to minimize fracture force at maximum distance between inserts and minimum insert speed.

This allows for high process productivity while simultaneously reducing kinetic energy consumption. Rational grinding parameters were established for the main cereal crops – corn, wheat, and barley.

The analysis of the obtained results confirms that the process parameters (distance between inserts $l = 1.68\text{--}1.79$ mm, installation angle $\beta = 21.8\text{--}25.3^\circ$, insert velocity $V = 4.72\text{--}5.86$ m/s, disk rotation speed $n = 1503\text{--}1865$ rpm, modular clearance $\delta = 0.68\text{--}0.79$ mm) reflect the physical and mechanical characteristics of each crop.

disc crusher, impact inserts, discrete element method (DEM), Simcenter STAR-CCM+, impact cutting, grain destruction, design parameters, optimization, energy efficiency

Одержано (Received) 22.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 631.362.5:621.867.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.147-163](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.147-163)

Е. Б. Алієв, ст. досл., д-р техн. наук, О. А. Черній

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua*

Аналіз віброживильників для транспортування та дозування насіння в системі їх автоматичного фенотипування

В роботі приведено актуалізацію використання віброживильників в сучасних технологічних лініях обробки та підготовки насіння сільськогосподарських культур. Наведені результати наукових досліджень процесу транспортування та дозування частинок сипкого вантажу по робочому органу віброживильника. Описано залежність якісних характеристик роботи віброживильників від впливу таких параметрів як гранулометричний склад часток вантажу, висоти транспортуемого шару вантажу, нахилу робочого жолоба чаші живильника до горизонту, кута нахилу вектора збурюючої сили, траєкторії руху робочого органу віброживильника та ін. Наведено аналіз існуючих конструкцій бункерних спіральних вібраційних живильників.

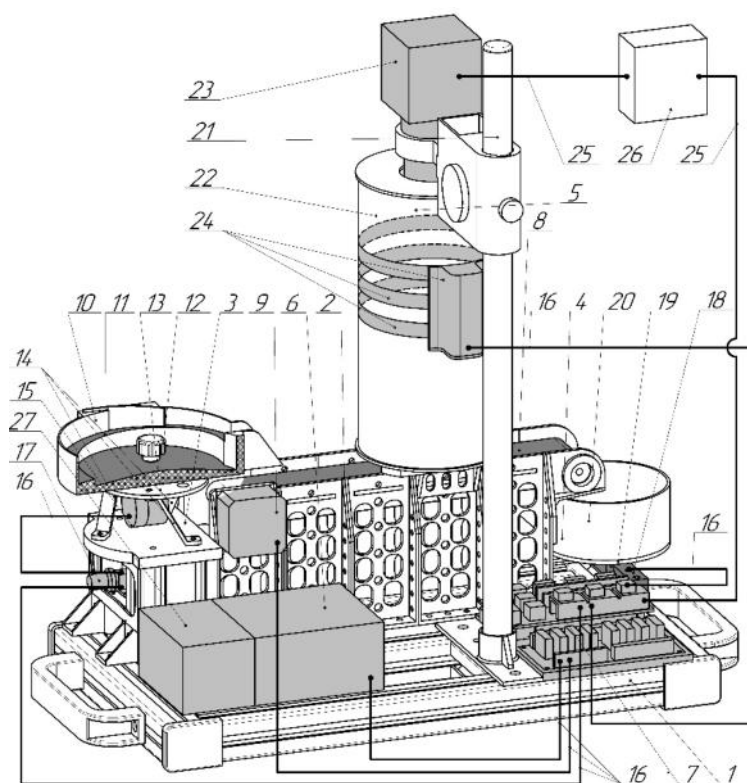
фенотипування насіння, вібраційний живильник, насіннєва суміш, параметри вібрації, робочий орган віброживильника, пружний елемент віброживильника, вібропривод, траєкторія руху робочого органу

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку аграрної галузі вимагають впровадження високоточних, автоматизованих технологій контролю якості насіннєвого матеріалу культурних рослин на етапі їх селекції [1]. Одним із ключових напрямів у цьому контексті є автоматичне фенотипування насіння за допомогою систем машинного зору [2, 3]. Ефективність таких систем значною мірою залежить від точного та стабільного транспортування і дозування насіння, що забезпечується відповідними технічними засобами – зокрема, віброживильниками.

Віброживильники мають ряд конструктивних і функціональних переваг, які роблять їх перспективними для використання в автоматизованих лініях фенотипування [4]. Проте їх ефективність істотно залежить від характеристик насіннєвого матеріалу, режимів вібрації та параметрів конструкції. Нерівномірність подачі або неправильне позиціонування насіння ускладнює роботу візуальних сенсорів та знижує достовірність зібраних даних. Це вимагає детального аналізу типів віброживильників, принципів їх дії та параметрів, що впливають на рівномірність подачі.

Таким чином, дослідження, присвячене аналізу віброживильників у контексті транспортування та дозування насіння для систем автоматичного фенотипування, є вкрай актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно попередніх досліджень [3,4] розроблена конструктивна-технологічна схема системи автоматичного фенотипування насіння сільськогосподарських культур, яка представлена на рис. 1. У складі системи автоматичного фенотипування насіння важливу роль відіграє блок подачі насіння, виконаний у вигляді віброживильника. Він складається з чаші з гвинтоподібною доріжкою, змонтованої на вібруючій поверхні з вібродвигуном і пружними пластинами. Така конструкція забезпечує рівномірну подачу насіння для точного позиціонування на стрічковому транспортері перед фотофіксацією. Керування вібродвигуном здійснюється через широтно-імпульсний модулятор, підключений до блоку керування. Оптимізація параметрів віброживильника дозволяє досягти стабільного потоку насіння, що необхідно для точного зчитування морфологічних характеристик за допомогою системи машинного зору.



- 1 – рама; 2 – стрічковий транспортер; 3 – блок для подачі насіння; 4 – блок для вимірювання маси; 5 – блок фотофіксації; 6 – блок живлення; 7 – блок керування; 8 – стрічка; 9 – кроковий двигун; 10 – чаша; 11 – гвинтоподібна доріжка; 12 – гвинт; 13 – віброуюча поверхня; 14 – пружні пластини; 15 – вібродвигун; 16 – електричні проводи; 17 – широтно-імпульсний модулятор; 18 – тензодатчик; 19 – пластина; 20 – бюкса; 21 – штатив; 22 – світлонепроникна труба; 23 – фотокамера; 24 – RGB-світлодіоди; 25 – USB-інтерфейс; 26 – персональний комп'ютер; 27 – акумулятор

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема системи автоматичного фенотипування насіння сільськогосподарських культур

Джерело: [3, 4]

Для підвищення ефективності функціонування системи автоматичного фенотипування насіння є потреба в дослідженнях взаємодії часток рухомого вантажу з віброуючим робочим органом для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів вібротранспортера.

Пошуком оптимальних параметрів процесу вібротранспортування різного роду сипких вантажів присвячено наукові роботи [6-20].

В роботі [6] досліджувалась швидкість транспортування мінеральної сировини (часток кварцу з середнім діаметром частинок $0,09 \div 0,106$ мм) по поверхні лотка віброживильника покритого гумовою футерівкою спеціальної конструкції (продольний переріз футерівки, має зубчасту поверхню з висотою зубців 0,4 мм та кутом нахилу твірних поверхонь зубців до горизонту 63° та 26°). Експериментально встановлено, що при параметрах вібрації (частота 50 Гц, кут підйому лотка 5°) вантаж не рухається при діапазоні амплітуд до 0,3 мм, а при збільшенні амплітуди коливань від 0,3 до 1,0 мм швидкість руху вантажу стрімко зростає. При сталій амплітуді коливань 0,6 мм та куту підйому лотка 5° відсутність руху вантажу відмічено в діапазоні частот $0 \div 30$ Гц. В діапазоні $30 \div 65$ Гц швидкість транспортування зростає повільно, а від 65 до 70 Гц відбувається стрімке зростання швидкості транспортування. При збільшенні кута

підйому лотка від 5° до 10° при частоті 50 Гц та амплітуді 0,6 мм, швидкість транспортування стрімко спадає до нуля.

В праці [7] чисельно проводився аналіз параметрів роботи вертикальних спіральних віброконвеєрів. Шляхом введення в теоретичні залежності контролера нелінійної пропорційної похідної, отримані оптимізовані параметри вібрації віброконвеєра.

Чисельне моделювання руху частинки по віброуючій поверхні з футерівкою досліджувалось в роботі [8]. Створені моделі часток вантажу у вигляді сфер з середнім радіусом 0,5 мм. Результати моделювання руху часток показали, що факторами, які найбільше впливають на швидкість транспортування є статичний коефіцієнт тертя та коефіцієнт тертя кочення часток по футерівці конвеєра. Моделювання руху частинок показало сталість швидкості руху часток по поверхні футерівки (від часу 1,5 с до 6,5 с частинки рухались зі сталою швидкістю 11,85 мм/с. Також відмічено, що зі збільшенням значення Y_h (відношення діаметру часток до висоти зубців футерівки) від 0,4 до 1,0 швидкість транспортування часток знижується з 12 до 1 мм/с.

Вертикальні вібраційні конвеєри завдяки своїм перевагам, активно використовуються не тільки як транспортуючі машини, а й машини для додаткової обробки рухомого вантажу. Так в роботі [9] автори обґрунтовують можливість використання вертикального віброконвеєра як машини для сушіння вологого гранульованого органічного матеріалу. Результатом дослідження є розраховані параметри вібросушарки, обґрунтовані режими сушіння, визначено шляхи для подальшого вдосконалення ефективності роботи сушильних агрегатів вібраційного типу. Варіант використання вертикальних вібраційних конвеєрів для дезінфекції та пастеризації зерен ячменю та пшеничного борошна висвітлено у роботах [10,11]. Було досліджено вплив параметрів віброприводу (кут нахилу осі вібромотора до горизонту, частота обертання ротора) на час перебування транспортуємого матеріалу в лотку конвеєра. Встановлено, що для зерен ячменю найбільша стабільність тривалості високотемпературної обробки (як фактора якості дезінфекції) відбуватиметься при кутах нахилу осі ротора вібромотора до горизонту 20° та 30° та частоті обертання ротора 600 хв^{-1} . Для борошна було встановлено, що тривалість транспортування, а отже і дезінфекції зменшується зі збільшенням кута нахилу осі ротора вібромотора до горизонту. При куті нахилу 20° середній час становив 545 с, тоді як при 40° – 222 с. Частота обертання ротора вібромотора також впливає на час транспортування. Так при збільшенні частоти обертання ротора з 600 хв^{-1} до 740 хв^{-1} відбувається зменшення часу транспортування борошна з 320 с до 260 с. В обох дослідженнях відмічається, що час транспортування і ячменю і борошна змінюється протягом деякого часу роботи вібротранспортера. Серед ймовірних причин, що сприяють цьому явищу, автори називають покриття поверхні робочого органу вібротранспортера в процесі роботи шаром пилевидних часток транспортуємого матеріалу, які зумовлюють зменшення швидкості транспортування. Також досліджувалось вплив статичного струму, що виникає між частинками вантажу та поверхнею лотка при їх взаємному терті. Найкращим способом відновлення продуктивності вібротранспортера, за дослідженнями авторів, є механічна очистка лотка скребком та промивання водою. Роботи по оптимізації роботи цих дезінфікуючих установок продовжуються.

Ще однією перевагою вертикальних вібраційних конвеєрів є те, що їх принцип роботи і конструкція дозволяє їх використовувати як бункери для сировини, а вібрація забезпечує регульовану швидкість подачі сировини для подальшої переробки. Тобто, завантаживши сипкий вантаж в лоток конвеєра та подаючи вібрацію можна дозувати вихід сипкого вантажу з лотка. Математичне обґрунтування нової конструкції

бункерного живильника (в літературі можна зустріти таку назву вертикальних вібраційних конвеєрів) досліджувалось в роботі [12]. Автори пропонують модель руху робочого органу по еліптичній траєкторії. При цьому в горизонтальній площині створювати вібрацію електромагнітним приводом, а вертикальну вібрацію – за рахунок кінематичних збуджувачів у вигляді нахилених до горизонту плоских пружин. Експериментально визначено коефіцієнт пружності пружин та коефіцієнт дисипації при яких відмічається оптимальний зсув фаз між вертикальною та горизонтальною амплітудами коливань робочого органу бункера живильника.

Вплив на швидкість руху вантажу в вертикальних вібраційних конвеєрах залежно від виду траєкторії коливань робочого органу досліджувався в роботі [13]. Експериментально підтверджено, що для транспортування вантажів, які мають низький коефіцієнт тертя, потрібно створювати еліптичні коливання робочого органу. А горизонтальна складова вібраційної сили найбільше впливає на швидкість руху вантажу в вертикальному віброконвеєрі. Змінюючи нахил осі ротора вібромотора та еліптичність траєкторії, можна регулювати не тільки швидкість руху різних вантажів, а й подовжувати довговічність лотка конвеєра при його абразивному зношуванні.

Основні шляхи збільшення продуктивності вертикальних вібраційних конвеєрів при транспортуванні гранульованих сипких вантажів висвітлено в статті [15]. Автори представили дослідну установку з вібраційним приводом оригінальної конструкції. Регулюючи розміщення дебалансів, можна забезпечити рух робочого органу вібротранспортера по прямій, коловій та еліптичній траєкторіям. Використовуючи у якості імітації гранульованого сипкого вантажу скляні кульки з діаметром 1 мм в кількості 300 000 шт, було встановлено, що їх найбільша швидкість транспортування виникає при лінійній траєкторії руху робочого органу (близько 90% амплітудного значення швидкості руху жолоба), а при коловій траєкторії руху максимально отрималось близько 50% амплітудного значення швидкості руху жолоба. Також найоптимальніше вібромашина працювала з значенням коефіцієнту режиму роботи інерційного віброконвеєра $\Gamma = 3,0$ при куті нахилу лінії сил вібрації до горизонту 31° . При збільшенні статичного коефіцієнту тертя вантажу (до 1,0) та збільшенні кута нахилу лінії коливання до 60° , збільшується значення (до 0,62) мінімального коефіцієнту Γ режиму роботи інерційного віброконвеєра, при якому починає рух потік вантажу по жолобу. А при коловій траєкторії руху жолоба при однакових параметрах коефіцієнтів тертя вантажу та куті нахилу векторів сили вібрації для руху вантажу потрібно забезпечувати більше значення коефіцієнту Γ режиму роботи інерційного віброконвеєра ніж при лінійній траєкторії. Важливим результатом досліджень є вплив товщини шару транспортуемого матеріалу на швидкість його переміщення. Встановлено, що швидкість руху гранульованого вантажу зростає до значення висоти шару, що дорівнює десятиєм діаметрам часток вантажу. Цікавим є дослідження авторів щодо появи при вібротранспортуванні сипкого вантажу хвиль з псевдозрідженим шаром частинок вантажу. Встановлена емпірична залежність довжини хвилі сипкого вантажу з псевдозрідженим шаром при зміні коефіцієнту Γ у вигляді $\lambda(\Gamma) = 1.3 \text{ cm} + 20 \text{ cm} \cdot \Gamma^{-1.9}$ (при сталій амплітуді коливань 1,47 мм). Також експерименти показали, що найбільшою швидкістю руху жолоба вібраційного конвеєра при якій вантаж переходить в псевдозріджений стан становить 0,2 м/с (при діапазоні частот коливання 20-60 Гц). Перехід частинок вантажу в псевдозріджений стан відбувається при встановленні коефіцієнту Γ режиму роботи інерційного віброконвеєра, що дорівнює значенню 5. При подальшому підвищенні значення цього коефіцієнта суттєво знижується продуктивність вібротранспортера.

В роботі [16] представлено наукові результати чисельного моделювання з використанням платформи STAR-CCM + руху насіння соняшнику по вібруючій поверхні, яка обдувається стисненим повітрям. А проведені експериментальні

дослідження дозволили визначити оптимальні значення параметрів, що впливають на продуктивність машини та затрати потужності на привод. Так доведено, що для отримання максимальної продуктивності вібраційної машини 1029 кг/год, потрібно дотриматися таких значень параметрів машини: кути нахилу віброуючої поверхні $\alpha = 3,8^\circ$, $\beta = 4,0^\circ$; робоча частота вібрації $\psi = 5$ Гц; швидкість руху повітря $v = 4$ м/с.

Постановка завдання. Метою досліджень є аналіз конструктивних особливостей та принципів дії віброживильників, що використовуються для транспортування та дозування насіння, з метою визначення оптимальних технічних рішень для забезпечення рівномірної та керованої подачі насіннєвого матеріалу в системах автоматичного фенотипування, орієнтованих на застосування технологій машинного зору.

Аналіз конструктивних особливостей та принципів дії віброживильників. Транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур засобами вібраційної техніки має свої особливості та тонкощі. Кожний вид насіння характеризується різноманітністю геометричних, механіко-технологічних та реологічних параметрів. Це носить суттєвий вплив на продуктивність та точність дозування вібротранспортерів. Адже під кожний вид насіння потрібно оптимізувати конструктивно-технологічні показники вібраційних живильників. Тому ціллю даного дослідження є аналіз та систематизація досягнень та шляхів покращення якості роботи вібромашин для транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур.

В різних галузях промисловості застосовується велике число вібромашин, які відрізняються конструктивним виконанням і технологічними функціями. Професорами А.А. Співаковським і І.Ф. Гончаревичем [5] запропонована класифікація вібромашин (рис. 2) по їх виробничому призначенню. В промисловості найбільш широко поширені наступні вібромашини: конвеєри, грохоти, живильники, живильники-грохоти, бункери-дозатори, спонукачі і ін. Віброживильники випускають і доставляють сипкі вантажі з бункерів, кузовів та інших акумулюючих ємностей при невеликій довжині транспортування. По конструктивних ознаках віброконвеєри та віброживильники розділяються відповідно до режиму роботи на резонансні і зарезонансні; по числу мас, що коливаються – на одномасні і багатомасні; по типу приводу – на машини з ексцентриковим, інерційним, електромагнітним, електромеханічним, пневматичним приводом; по напрямку транспортування – на горизонтальні, похилі спадні, похилі підіймаючі, вертикальні, по криволінійній траєкторії; за типом пружної підвіски – з підвіскою у вигляді пакету плоских металевих або полімерних пружин, з підвіскою у вигляді круглих стержнів, з підвіскою у вигляді ґратчастих гіперболоїдних торсіонів, з підвіскою гумовими віброізоляторами; за способом зміни резонансних налаштувань вібрації робочих органів – зміною кількості пружних елементів, зміною жорсткісних характеристик підвіски, зміною робочої маси віброживильника, зміною робочої частоти коливань; за формою робочих органів – лоткового типу, чашоподібного типу (циліндрична та конічна).

Є чотири основні способи переміщення сипких вантажів вібраційними конвеєрами (рис. 3): ковзання (рис. 3, а) (частинки сипкого вантажу знаходяться у постійному контакті з поверхнею жолоба), підкидування (рис. 3, б) (переміщення частинок відбувається за допомогою мікрокидків, створюваних вібруванням жолоба), храпове транспортування (рис. 3, в) (переміщення частинок матеріалу відбувається за рахунок лише вертикальної вібрації жолоба, що має спеціальний профіль поверхні), поверхневе переміщення частинок сипкого вантажу по ворсовій поверхні (рис. 3d) (напрямок та швидкість руху частинок вантажу регулюється напрямом та кутом нахилу ворсинок на жолобі вібротранспортера. При цьому жолоб вібрує тільки в вертикальній площині).

Важливими параметрами, при оптимізації транспортування сипких вантажів вібраційними конвеєрами, являються: гранулометричний склад та форма частинок сипкого вантажу (при експериментах відмічено, що частинки сипкого вантажу більших

розмірів під вібраційним впливом виштовхуються на поверхню транспортуемого шару вантажу. Цей феномен названо «ефектом бразильського горіха» [18]). Також важливим є тертя між частинками вантажу та частинок з стінками робочого органу конвеєра, модуль пружності частинок вантажу або транспортуемого шару сипкого вантажу, когезія, товщина шару транспортуемого сипкого вантажу та його проникність повітрям. На рис. 4 представлено основні конструктивні параметри вертикальних спіральних віброживильників.



Рисунок 2 – Класифікація вібромашин для випуску, доставки, навантаження і транспортування сипких та штучних вантажів

Джерело: розроблено авторами

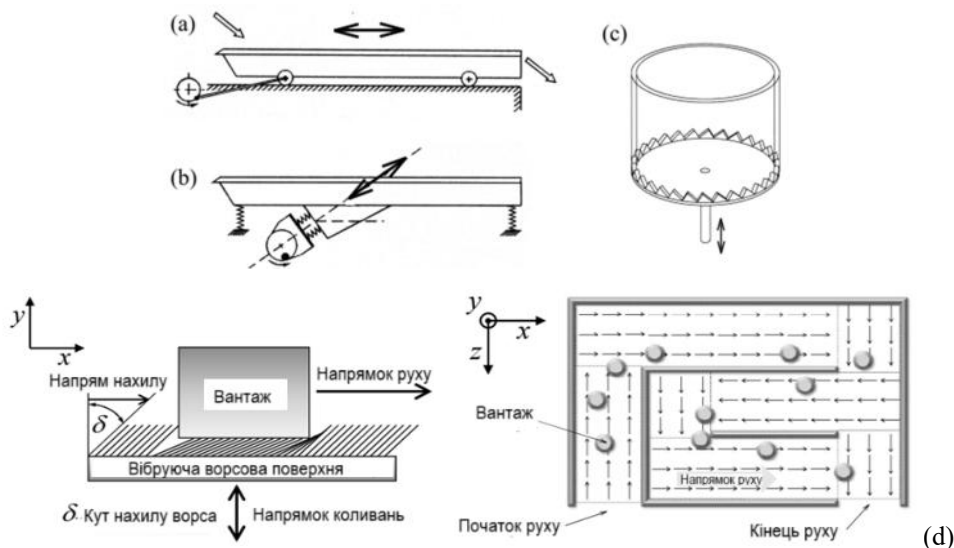


Рисунок 3 – Схеми способів переміщення вантажів у віброконвеєрах: а – ковзання; б – підкидування; с – храпове транспортування; д – поверхневе переміщення частинок сипкого вантажу по ворсовій поверхні

Джерело: розроблено на підставі [17]



Рисунок 4 – Схема будови та конструктивних параметрів робочого органу вібраційного бункерного живильника

Джерело: розроблено на підставі [18]

Основними перевагами вертикальних спіральних чашових віброконвеєрів в порівнянні з горизонтальними віброконвеєрами являються:

- невелика займаєма площа в виробничих приміщеннях;
- завдяки більшому часу транспортування вантажів, паралельно з процесом транспортування можуть виконуватись процеси сушіння, охолодження, а також орієнтування вантажів для наступного технологічного процесу;
- забезпечує плавне транспортування вантажів, які важко транспортувати іншими видами конвеєрів. Наприклад, вантажі, що мають складну форму а також вантажі сферичної форми;
- забезпечує постійну швидкість транспортування вантажів, що позитивно впливає на якість послідовних технологічних процесів обробки вантажу-сировини;
- може легко змінювати свою продуктивність за рахунок зміни параметрів віброприводу (маса дебалансів, частота обертання ротора, частота вхідного електричного струму та ін.);
- може використовуватись у якості віброживильників для рівномірної подачі штучних вантажів для їх подальшої обробки на технологічних машинах;
- при транспортуванні утворення пилу з частинок вантажу мінімальне;
- простота конструкції забезпечує низьку трудомісткість робіт при технічному сервісі механізмів конвеєра.

На рис. 5 та 6 представлено конструктивну схему та загальну будову вібраційного конвеєра та спірального живильника.

Використання вібраційних машин в промисловості має давню історію. Методика синтезу вібротранспортуючих машин викладена в Директиві VDI 2333 Schwingförderer für Schüttgut [17]. Цей документ на сьогодні є основою в країнах Європейського Союзу для промислового конструювання вібраційних конвеєрів призначених для транспортування сипких вантажів.

Тривала практика використання методики Директиви VDI 2333 показала, що найбільшої точності мають розраховані параметри швидкості руху сипкого вантажу при значенні коефіцієнту часу вільного польоту n частинки вантажу в межах $0,7 < n < 0,9$ та значеннях кута нахилу вектора збурюючої сили віброприводу до поверхні жолоба $20^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$.

Основною характеристикою роботи будь-якої транспортуючої машини являється її продуктивність, а отже, швидкість переміщення часток вантажу по поверхні робочого органу. Звичайно, що ця швидкість повинна бути оптимальною в економічному плані,

робота машини на таких швидкостях не повинна знижувати показники технічної надійності і, основне, не травмувати й не пошкоджувати вантаж при транспортуванні. Факторів, що впливають на продуктивність віброконвеєрів є досить багато. Серед основних є тип вібропривода, використання пружних та демпфуючих елементів в конструкції вібраційної машини. Найбільш простими у будові є двомасні віброконвеєри. Але при їх роботі отримуються порівняно невеликі значення швидкостей руху вантажу по робочому органу. Такі бункерні вібраційні живильники використовують у якості привода електромагніти з робочими частотами струму 50-100 Гц та характеризуються пружною підвіскою (поз.3, рис.5) робочого органа у вигляді пруткових або плоских пружинних елементів, що нахилені під певним кутом до горизонту. В цьому конструктивному рішенні реалізуються коливання чаші за способом направленої підвіски і найоптимальнішим режимом транспортування сипких вантажів є білярезонансне налаштування віброживильника.

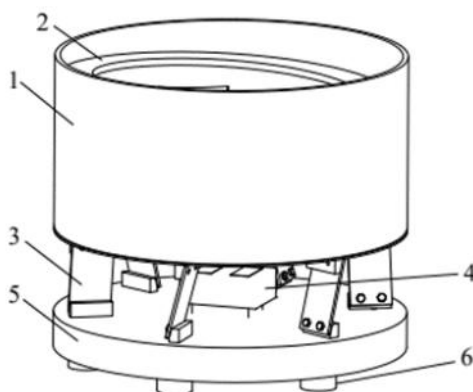
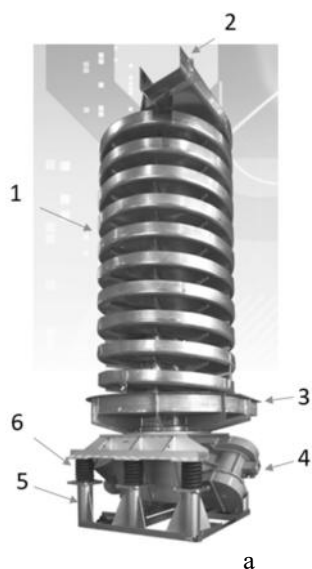


Рисунок 5 – Будова спірального вібраційного бункерного живильника: 1 – вібраційний бункер;
2 – жолоби по яким рухаються частинки вантажу; 3 – пружна підвіска бункера; 4 – електромагніт;
5 – реактивна маса; 6 – віброізолятори

Джерело: розроблено на підставі [18]



а



б

Рисунок 6 – Загальний вигляд вертикальних спіральних вібраційних машин: а – вібраційний конвеєр:
1 – вібраційний лоток; 2 – місце випуску транспортованої сировини; 3 – накопичувальний лоток сипких вантажів; 4 – вібропривод електричний; 5 – опорна рама; 6 – пружні елементи, б – спіральний вібраційний живильник

Джерело: розроблено на підставі [21]

Хоча така пружна підвіска й характеризується простотою будови та високою експлуатаційною надійністю, але має ряд недоліків таких як немонолітність конструкції, складність організації системи кріплення пружних елементів, необхідність технічної перевірки справності підвіски тощо. Цікавим конструктивним рішенням, яке дає змогу покращити характеристики пружної системи вібраційного бункерного спірального живильника є використання пружного елемента у вигляді торсіону гіперболоїдного виду (рис.7). Завдяки монолітності конструкції та відсутності різьбових з'єднань, такі пружні елементи легко монтувати та забезпечувати стабільність параметрів вібрації. Основним недоліком торсіонів гіперболоїдного виду є затрати на їх виготовлення та складність конструкції.

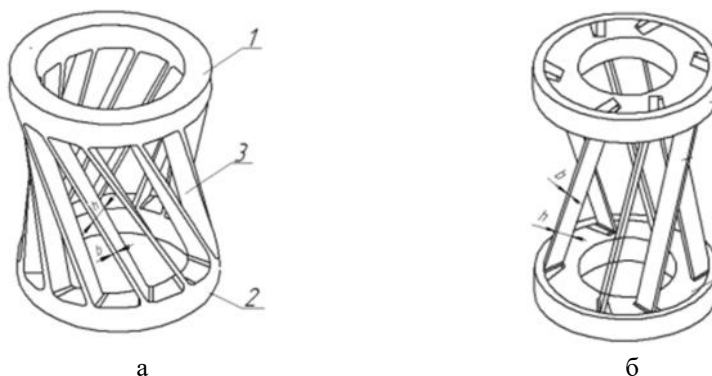


Рисунок 7 – Торсіони гіперболоїдного виду: а – монолітної; б – набірної конструкції; 1 – верхній фланець; 2 – нижній фланець; 3 – пружний елемент; h – ширина плоского пружного елемента; b – товщина пружного елемента

Джерело: розроблено на підставі [19]

На рис. 8 наведено типову конструкцію бункерного спірального вібраційного живильника з пружним органом у вигляді торсіону гіперболоїдного виду.

Робочий орган має спіральні жолоби 1 (рис. 8), по яким під дією коливань переміщуються частинки сипкого вантажу. Гіперболоїдний торсіон 2 верхнім фланцем жорстко кріпиться з бункером, нижнім фланцем кріпиться з реактивною масою 3. До рами 5 торсіон 2 з'єднується через втулки 4. Корпус електромагніта 8 кріпиться до реактивної маси 3 і через якір 6 та трубу 7 передає гармонійну збудовальну силу до верхнього фланця торсіону. Існують конструкції, що мають в складі пружної підвіски як гумові деталі так і сталеві. Приклад такого віброживильника наведено на рис 9.

Пошук оптимальних параметрів вібрації в таких конструкціях дають змогу забезпечити гумові віброізолятори 7,8 з різними жорсткісними характеристиками.

Важливим при роботі вібраційних бункерних живильників є збереження їх продуктивності при зміні їх експлуатаційних параметрів. Наприклад ваги вантажу, що перебуває у бункері. Адже при його зменшенні зменшується вага робочого навантаження, а отже, і вібраційний режим конвеєра. Конструкція бункерного віброживильника представлена на рис.10 має таку ознаку, як рухоме конусне дно бункера 8. Це дає змогу зменшити вплив на продуктивність віброконвеєра зміни маси вантажу при транспортуванні, знизити затрати на електроенергію та знизити рівень робочого шуму.

Вібраційні спіральні бункерні віброживильники, що мають електромагнітний вібропривод та пружну підвіску з направленими коливаннями найбільше використовуються при транспортуванні та позиціонуванні вантажу для подальшої технологічної дії у системах з невеликими потужностями. Недоліком таких конструкцій є необхідність використання реактивних мас, що призводить до збільшення затрат на виготовлення віброживильників, а також до збільшення загальної маси вібромашини.

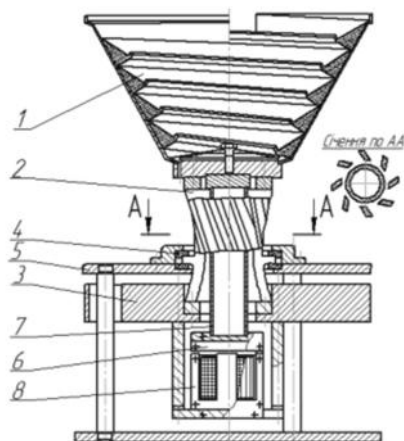


Рисунок 8 – Вібровививальник з гіперболоїдним торсіонним пружним елементом та конусною чашею:

1 – конусний бункер з спіральними жолобами; 2 – верхній фланець гіперболоїдного торсіону;
3 – реактивна маса; 4 – втулки; 5 – рама; 6 – якорь електромагнітного вібропривода; 7 – передавальна труба; 8 – корпус електромагнітного вібропривода

Джерело: розроблено на підставі [19]

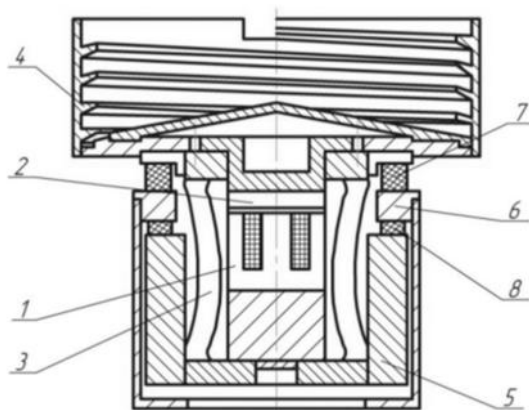


Рисунок 9 – Вібровививальник з гумово-металевою пружною підвіскою:

1 – електромагніт; 2 – якорь електромагніта; 3 – сталевий торсіон гіперболоїдного виду; 4 – бункер з спіральними жолобами; 5 – реактивна маса; 6 – корпус; 7, 8 – гумові пружні елементи

Джерело: розроблено на підставі [19]

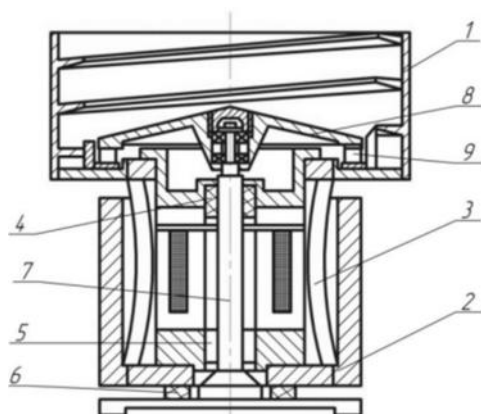


Рисунок 10 – Вібраційний бункерний живильник з обертовим днищем: 1 – бункер; 2 – реактивна маса;

3 – сталевий торсіон гіперболоїдного виду; 4, 5, 6 – гумові пружні елементи; 7 – нерухома стійка; 8 – обертове дно бункера; 9 – механізм передавання обертання

Джерело: розроблено на підставі [19]

Перспективними є двомасні і багатомасні віброконвеєри, що завдяки своїй конструкції можуть створювати еліптичні траєкторії руху при коливаннях робочого органу. Такі коливання сприяють збільшенню значень робочих швидкостей руху часток вантажу по робочому вібруючому органі. Створюючи еліптичні коливання, ускладнюється конструкція вібромашин, підвісок робочих органів та будови віброприводів. Тому, основною задачею конструкторів є отримання якісної, продуктивної та надійної вібромашини. Складною задачею є створення еліптичних траєкторій руху робочих органів вертикальних спіральних віброконвеєрів. Для цього необхідно змінювати не тільки будову і віброприводів і пружних підвісок, а також прискіпливо визначати параметри пружності і в'язкості елементів віброконвеєра.

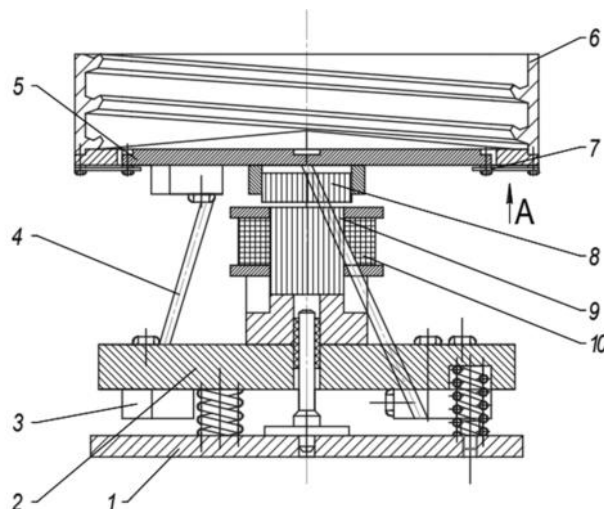


Рисунок 11 – Будова вертикального вібраційного живильника з еліптичною траєкторією руху робочого органу: 1 – віброізоляційна основа; 2 – плита кріплення електромагнітного віброприводу; 3 – кронштейни кріплення плоских пружин; 4 – плоскі пружини; 5 – днище бункера; 6 – корпус живильника з внутрішнім спіральним жолобом; 7 – пружний елемент; 8 – ярмір; 9 – осердя магніту; 10 – обмотка електромагніту

Джерело: розроблено на підставі [19]

Провівши аналіз сучасних досягнень в сфері розвитку машин для вібротранспортування, встановлено, що є декілька основних технічних способів, що сприяють утворенню еліптичних траєкторій руху робочого органу вертикальних віброживильників. Першим способом є розрив жорсткого зв'язку робочого органу віброконвеєра з віброприводом та введення демпфуючих та пружних елементів між ними. Це дає змогу змінювати амплітуди вертикальних та горизонтальних коливань робочого органу, утворювати зсув фаз коливань і, як наслідок, створення руху точок робочого органу по еліптичній траєкторії. На рис. 11 представлена конструктивна схема віброживильника з еліптичною траєкторією руху чаші.

Робочий процес пристрою відбувається так. При подачі струму на обмотку 10 електромагніту, ярмір 8, що прикріплений до платформи 5, отримує вертикальні та горизонтальні коливання. Коливання ярмира 8 через три похилі плоскі пружини 4 перетворюються в коливання платформи 5 в вертикальному і горизонтальному напрямках. Таким чином, платформа 5 отримує зворотно-поступальний рух від центрального електромагнітного вібратора, встановленого в центрі вібраційного живильника і здійснює вимушені лінійні коливання, що перпендикулярні осі похилої пружини, а бункер 6 коливання у вертикальній площині зі зміщенням фази щодо коливань платформи 5. Лінійні коливання платформи 5 мають горизонтальну та

вертикальну складові. Їхнє співвідношення залежить від кута нахилу осі пружин 4, при цьому бункер 6 здійснює такі ж горизонтальні коливання як і платформа 5, так як пружні елементи 7 мають жорсткість в горизонтальній площині, яка набагато більша ніж у вертикальній площині. При цьому вертикальні коливання бункеру 6 будуть мати величину відмінну від величини коливань платформи 5. Таким чином забезпечуються коливання бункеру 6 по еліптичній траєкторії в результаті складення гармонічних коливань в двох взаємоперпендикулярних площинах при фазовому зміщенні.

Другим способом отримання еліптичної траєкторії руху матеріальної точки робочого органу вертикального віброконвеєра є спеціальне розміщення віброприводів. Такий спосіб захищений патентом на винахід Чеської республіки [14]. На рис. 12 схематично представлено способи розміщення віброприводів у вертикальних віброживильників, що дають змогу отримувати еліптичні траєкторії руху матеріальних точок робочого органу машини. Встановлення дебалансних віброприводів під деяким кутом A до вертикальної осі віброконвеєра (рис. 12, а), а також зміщення осей віброприводів по горизонталі на величину B (рис. 12, б) є конструктивно простими та малозатратними способами створення еліптичних траєкторій руху робочого органу. Основною перевагою таких способів є також можливість встановлення сервоприводів, які б змінюючи параметри встановленні віброприводів (кут нахилу та зміщення), створювали еліптичну траєкторію руху змінної характеристики. Це дає змогу проводити налаштування продуктивності віброконвеєра при транспортуванні сипких вантажів аграрного виробництва. Наприклад, насіння різних культур, насіння з різною вологістю та іншими реологічними параметрами.

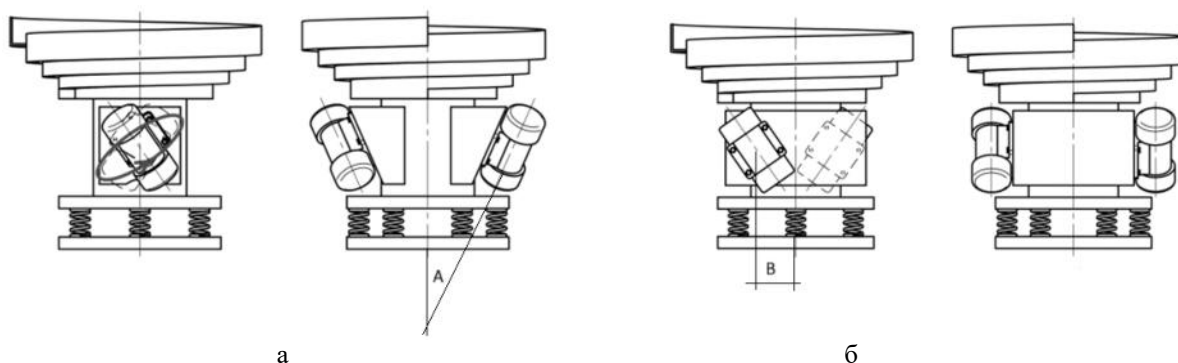


Рисунок 12 – Варіанти розміщення віброприводів в вертикальному вібраційному конвеєрі для отримання еліптичних траєкторій руху робочого органу: а – осі дебалансних віброприводів нахилені під кутом A до вертикалі; б – дебалансні віброприводи зміщені на величину B від центральної вертикальної осі віброконвеєра

Джерело: розроблено на підставі [14]

Аналіз приводів віброконвеєрів

Електромагнітні приводи (рис.13) дозволяють регулювати параметри вібрації безступенево. Дають миттєве максимальне значення потужності при ввімкненні та швидкий час зупинки робочого органу конвеєра при вимкненні. Таким чином транспортуємий матеріал швидко припиняє рух. Це дозволяє використовувати їх в вібраційних дозаторах. Приводи таких типів мають високу довговічність, магнітний вібратор захищений від перегріву. Завдяки простоті конструкції швидко вводяться в дію та налаштовуються на параметри системи. Недоліком таких приводів є суттєва залежність амплітуди та частоти вібрацій від напруги електричної мережі. Як наслідок зменшення продуктивності віброконвеєра при коливаннях напруги електричного струму. Також постійність частоти та малі амплітуди (0,5–2,0 мм) обмежують

можливість використання електромагнітних віброзбудувачів для транспортування пилевидних насипних вантажів.



Рисунок 13 – Загальний вигляд електромагнітних віброприводів віброживильників
Джерело: розроблено на підставі [22]

Дебалансні відцентрові віброзбудувачі (рис. 14) використовуються в якості генерування вібрації в таких машинах як віброконвеєри, віброживильники, вібросита та ін. Можуть створювати направлені коливання з максимальним зусиллям поштовху до 119 кН та переміщувати вагу вантажу до 5000 кг. Такі віброприводи відомі своєю високою надійністю, продуктивністю, економічністю у використанні. Безшумність при роботі (до 76 дБ) та повна герметичність забезпечує санітарні та протипожежні вимоги промислових приміщень.



Рисунок 14– Дебалансні відцентрові віброзбудувачі
Джерело: розроблено на підставі [22]

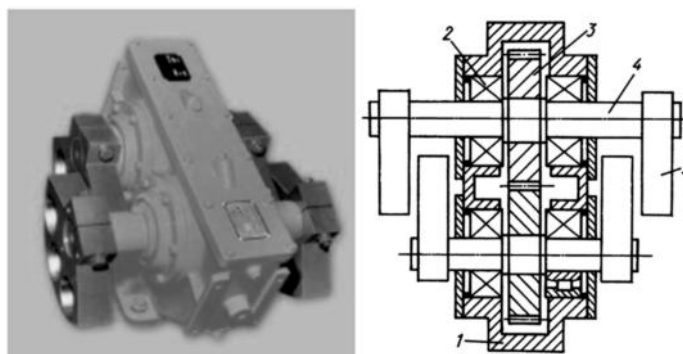


Рисунок 15 – Відцентровий привід направленої дії: 1 – корпус; 2 – підшипники; 3 – зубчасті колеса; 4 – вали; 5 – дебаланси
Джерело: розроблено на підставі [22]

Відцентровий привід направленої дії (рис. 15) використовуються для вібромашин високої продуктивності та транспортування вантажів з великим значенням насипної щільності при одночасному завантаженні більше 4000 кг. Можуть створювати коливання з зусиллям до 424 кН. Приводяться в дію від електричних асинхронних двигунів через карданний вал, пружну муфту або пасову передачу. Мають тривалий технічний ресурс, строк використання, безшумність при роботі та широкий діапазон регулювання параметрів вібрації.

Оригінальну конструкцію привода вібраційного транспортера описано в науковій роботі [15]. На рис. 16 представлено фото дослідного вібропривода конвеєра. Змінюючи положення дебалансів отримують різні траєкторії руху робочого органу віброживильника.

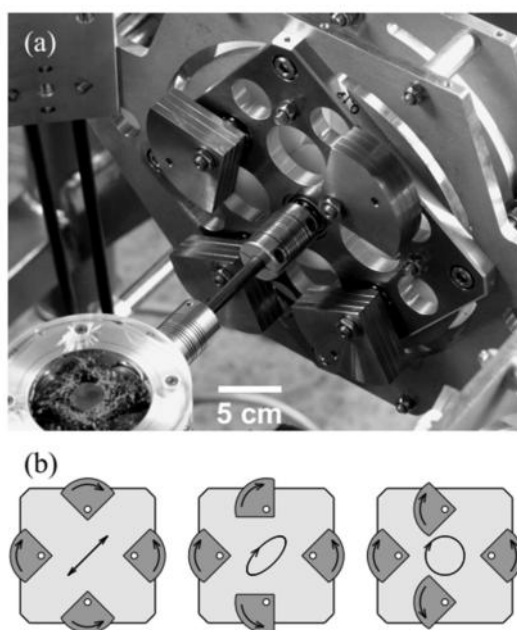


Рисунок 16 – Вібропривода з дебалансами: а – загальний вигляд;
б – положення встановлення дебалансів на валах для отримання лінійної
(кут зсуву фаз горизонтальних та вертикальних коливань $\varphi = 0$),
еліпсної (кут зсуву фаз горизонтальних та вертикальних коливань $\varphi = \pi/4$)
та колової (кут зсуву фаз горизонтальних та вертикальних коливань $\varphi = \pi/2$)
траєкторій руху робочого органу віброконвеєра

Джерело: розроблено на підставі [15]

Висновки. Одним з найбільш ефективних сучасних способів очищення, сепарації та сортування насіння сільськогосподарських культур є спосіб фенотипування. Системи фенотипування використовують у своїй будові велику кількість механічних та мехатронних елементів, які дозволяють працювати їм у автоматичному режимі. Запорукою високоефективної роботи систем автоматичного фенотипування насіння є організація рівномірної, регульованої подачі насіннєвого матеріалу на стрічковий конвеєр з метою сканування його параметрів (кольору, розміру, форми) автоматичними цифровими датчиками-відеокамерами. Серед великого різноманіття конструкцій дозаторів, живильників, висівних пристроїв та ін, як засобів видачі насіння з акумулюючих ємностей (бункерів), особливої уваги заслуговують вібраційні бункерні спіральні живильники. Характеризуючись великою кількістю переваг в конструкції та техніко-економічних показниках та маючи тривале практичне

застосування, спіральні віброживильники розглядаються як основні пристрої дозування насіння в сучасних автоматичних лініях фенотипування.

Проведено аналіз наукових досліджень процесів транспортування та дозування сипких вантажів з використанням вібраційних живильників. Встановлено, що вібраційні спіральні живильники мають ряд переваг перед лотковими віброконвеєрами. Аналіз конструкцій вібраційних живильників для транспортування насіння, надав змогу виділити основні тенденції в їх розвитку конструктивно-технологічних параметрів. Огляд показав, що пружними елементами віброживильників для дозування сипких та мілко-штучних вантажів є полімерні або металеві ресори у вигляді нахилених під кутом до горизонту стержнів або пластин. Широкого розповсюдження має пружня підвіска бункера живильника у вигляді гіперболоїдного торсіону. Актуальним напрямом розвитку конструкцій вібраційних спіральних живильників є забезпечення коливання робочого органу по еліптичній траєкторії. Досягти це можливо такими способами: створення спеціальної конструкції пружних елементів віброживильника, раціональне розміщення віброприводів відносно робочого органу, використання віброприводів, що можуть змінювати траєкторію руху робочого органу на лінійну, колову та еліптичну. Зважаючи на результати наукового огляду, можна стверджувати, що найоптимальнішим видом віброприводу в спіральних вібраційних живильниках, які можуть використовуватись в системах автоматичного фенотипування насіння, є дебалансні відцентрові віброзбуджувачі.

Матеріал надав змогу систематизувати досягнення у розвитку конструкцій та шляхів підвищення ефективності використання вібраційних живильників для транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур в автоматичних системах фенотипування.

Список літератури

1. Pieruschka R., Schurr U. Plant Phenotyping: Past, Present, and Future. *Plant Phenomics*. 2019. Vol. 2019. P. 1–6. DOI: 10.34133/2019/7507131
2. Алієв Е. Б. Автоматичне фенотипування насіннєвого матеріалу соняшнику : монографія. Київ : Аграрна наука, 2022. 104 с.
3. Алієв Е. Б., Ведмедева К. В. Кількісне фенотипування генотипів соняшнику : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 204 с.
4. Ланець О. С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Кн. 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органу : навч. посіб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. 612 с.
5. *Підйомно-транспортні машини* : підруч. / Кобець А. С. та ін. ; за ред. А. С. Кобця, В. І. Дирди. Луганськ : ДЗ «ЛНУ ім. Т. Шевченка», 2013. 218 с.
6. Chen H., Li L., Zhang W., Liu R., Jiang S. A Vibratory Conveying Method for Planetary Regolith: Preliminary Experiment and Numerical Simulation. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 29386–29396. DOI: 10.1109/access.2019.2902348
7. Hamed Y. S., Alotaibi H., El-Zahar E. R. Nonlinear Vibrations Analysis and Dynamic Responses of a Vertical Conveyor System Controlled by a Proportional Derivative Controller. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 119082–119093. DOI: 10.1109/access.2020.3005377
8. Chen H., Jiang S., Liu R., Zhang W. Particle Directional Conveyance under Longitudinal Vibration by Considering the Trough Surface Texture: Numerical Simulation Based on the Discrete Element Method. *Shock and Vibration*. 2018. Vol. 2018. P. 1–13. DOI: 10.1155/2018/8260462
9. Ніколайчук І. І., Ратушняк Г. С., Коц І. В. Математичне моделювання і оптимальне управління робочим процесом сушильної камери. *Вісник ВПІ*. 2005. № 6. С. 196–199.
10. Keppler S., Bakalis S., Leadley C. E., Fryer P. J. Processing of Barley Grains in a Continuous Vibrating Conveyor. *Journal of Food Engineering*. 2016. Vol. 187. P. 114–123. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.04.010.

11. Keppler S., Bakalis S., Leadley C. E., Fryer P. J. A Systematic Study of the Residence Time of Flour in a Vibrating Apparatus Used for Thermal Processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Vol. 33. P. 462–471. DOI: 10.1016/j.ifset.2015.12.003
12. Bepalov A., Svidrak I., Boiko O. Study of the Dynamic Model of the Oscillating System of Vibratory Feeders with an Elliptical Trajectory of the Movement of the Working Body. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*. 2022. Vol. 24 (98). P. 76–81. DOI: 10.32718/nvlvet-f9814
13. Calta J. Vibratory Conveyor with Elliptical Oscillation is Quiet and Fast. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. 2024. Vol. 8. P. 1–12. DOI: 10.13140/RG.2.2.10392.37128
14. Vibratory Conveyor with Elliptical Oscillation. *ROBOTERM* : веб-сайт. URL: <https://www.roboterm.cz/en/induction/elliptical-oscillation> (дата звернення: 25.04.2025).
15. Krülle C. A., Götzendorfer A., Grochowski R., Rehberg I., Rouijaa M., Walzel P. Granular Flow and Pattern Formation on a Vibratory Conveyor. *Traffic and Granular Flow'05*. 2007. P. 111–128. DOI: 10.1007/978-3-540-47641-2_9
16. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the Sunflower Seed Separation Process Efficiency on the Vibrating Surface. *Acta Periodica Technologica*. 2019. Vol. 50. P. 12–22. DOI: 10.2298/apt1950012a
17. VDI 2333:2017-10. *Schwingförderer für Schüttgut (Vibration Conveyors for Bulk Material)*. [Чинний від 2017-10]. Berlin, 2017. 32 с. (Технічні вимоги Німеччини).
18. Dallinger N. Die Diskrete Elemente Methode als Simulationsmethode in der Vibrationsfördertechnik : дис. ... доктора-інженера. Технічний університет м. Хемніц. Хемніц, 2017. 158 с.
19. Печонка В. С. Розроблення і проектування вібраційного бункерного живильника : кваліфікац. роб. ... бакалавра. Дубляни : Львів. нац. ун-т природокористування, 2023. 45 с.
20. Zhao Y. J., Huang F. S., Zhao Z. L. Dynamic Analysis on Vertical Vibratory Conveyor. *Advanced Materials Research*. 2013. Vols. 694–697. P. 3–6. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.3
21. *Vibrating Conveyors. Каталог конструкцій*. Sinfoniya Technology Co., Ltd, 2015. 22 с.
22. *Vibrating Conveyors. Каталог конструкцій*. AVITEQ Vibrationstechnik GmbH, 2023. 20 с.

References

1. Pieruschka, R., & Schurr, U. (2019). Plant phenotyping: Past, present, and future. *Plant Phenomics*, 2019, 1–6. <https://doi.org/10.34133/2019/7507131>
2. Aliiev, E. B. (2022). *Automatic phenotyping of sunflower seed material: Monograph*. Kyiv: Agrarian Science [in Ukrainian].
3. Aliiev, E. B., & Vedmedieva, K. V. (2024). *Quantitative phenotyping of sunflower genotypes: Monograph*. Dnipro: LIRA [in Ukrainian].
4. Lanets, O. S. (2018). *Fundamentals of calculation and design of vibration machines. Book 1. Theory and practice of creating vibration machines with harmonic motion of the working body: Textbook*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
5. Kobets, A. S., et al. (2013). *Lifting and transport machines: Textbook*. A. S. Kobets & V. I. Dyrda (Eds.). Luhansk: LNU named after T. Shevchenko [in Ukrainian].
6. Chen, H., Li, L., Zhang, W., Liu, R., & Jiang, S. (2019). A vibratory conveying method for planetary regolith: Preliminary experiment and numerical simulation. *IEEE Access*, 7, 29386–29396. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2902348>
7. Hamed, Y. S., Alotaibi, H., & El-Zahar, E. R. (2020). Nonlinear vibrations analysis and dynamic responses of a vertical conveyor system controlled by a proportional derivative controller. *IEEE Access*, 8, 119082–119093. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3005377>
8. Chen, H., Jiang, S., Liu, R., & Zhang, W. (2018). Particle directional conveyance under longitudinal vibration by considering the trough surface texture: Numerical simulation based on the discrete element method. *Shock and Vibration*, 2018, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/8260462>
9. Nikolaichuk, I. I., Ratuszniak, H. S., & Kots, I. V. (2005). *Mathematical modeling and optimal control of the working process of a drying chamber*. *Visnyk VPI*, (6), 196–199 [in Ukrainian].
10. Keppler, S., Bakalis, S., Leadley, C. E., & Fryer, P. J. (2016). Processing of barley grains in a continuous vibrating conveyor. *Journal of Food Engineering*, 187, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.010>
11. Keppler, S., Bakalis, S., Leadley, C. E., & Fryer, P. J. (2016). A systematic study of the residence time of flour in a vibrating apparatus used for thermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.003>

12. Bespalov, A., Svidrak, I., & Boiko, O. (2022). Study of the dynamic model of the oscillating system of vibratory feeders with an elliptical trajectory of the movement of the working body. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 24(98), 76–81. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9814>
13. Calta, J. (2024). Vibratory conveyor with elliptical oscillation is quiet and fast. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*, 8, 1–12. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10392.37128>
14. *Vibratory conveyor with elliptical oscillation*. ROBOTERM: Website. Retrieved April 25, 2025, from <https://www.roboterm.cz/en/induction/elliptical-oscillation>
15. Krülle, C. A., Götzendorfer, A., Grochowski, R., Rehberg, I., Rouijaa, M., & Walzel, P. (2007). Granular flow and pattern formation on a vibratory conveyor. In *Traffic and Granular Flow'05* (pp. 111–128). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47641-2_9
16. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, 50, 12–22. <https://doi.org/10.2298/apt1950012a>
17. VDI 2333:2017-10. (2017). *Vibration conveyors for bulk material*. Berlin: VDI [Technical requirements, Germany].
18. Dallinger, N. (2017). *Die Diskrete Elemente Methode als Simulationsmethode in der Vibrationsfördertechnik* (Doctoral dissertation). Technical University of Chemnitz, Chemnitz.
19. Pechonka, V. S. (2023). *Development and design of a vibratory bunker feeder: Bachelor's qualification work*. Dublyany: Lviv National University of Nature Management [in Ukrainian].
20. Zhao, Y. J., Huang, F. S., & Zhao, Z. L. (2013). Dynamic analysis on vertical vibratory conveyor. *Advanced Materials Research*, 694–697, 3–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.3>
21. Sinfoniya Technology Co., Ltd. (2015). *Vibrating conveyors: Design catalog*. 22 p.
22. AVITEQ Vibrationstechnik GmbH. (2023). *Vibrating conveyors: Design catalog*. 20 p.

Elchyn Aliiev, Sr. Researcher, DSc, **Olexandr Chernii**

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Analysis of Vibrating Feeders for Transporting and Dosing Seeds in the System of Their Automatic Phenotyping

The paper presents the actualization of the use of vibrating feeders in modern technological lines for processing and preparing seeds of agricultural crops. The results of scientific research into the process of transporting and dosing particles of loose cargo along the working body of the vibrating feeder are presented.

The dependence of the qualitative characteristics of the operation of vibrating feeders on the influence of such parameters as the granulometric composition of cargo particles, the height of the transported cargo layer, the inclination of the working trough of the feeder bowl to the horizon, the angle of inclination of the disturbing force vector, the trajectory of movement of the working body of the vibrating feeder, etc. is described. An analysis of existing designs of bunker spiral vibrating feeders is presented.

Analysis of the designs of vibrating feeders has shown that an electromagnetic vibratory drive is most often used as a vibratory drive of feeders. The elastic elements of vibrating feeders are polymer or metal springs in the form of rods or plates inclined at an angle to the horizon. The elastic suspension of the feeder hopper in the form of a hyperboloid torsion is also widespread.

The current direction of development of designs of vibrating spiral feeders is to ensure oscillation of the working body along an elliptical trajectory. This can be achieved by the following methods: creating a special design of the elastic elements of the vibrating feeder, placing the vibration drives relative to the working body, using vibration drives that can change the trajectory of movement of the working body from linear to elliptical.

The material made it possible to systematize achievements in the development of designs and ways to increase the efficiency of using vibrating feeders for transporting and dosing seeds of agricultural crops.

seed phenotyping, vibrating feeder, seed mixture, vibration parameters, working body of the vibrating feeder, elastic element of the vibrating feeder, vibration drive, trajectory of movement of the working body

Одержано (Received) 10.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 631.362

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.164-174)**І. М. Бажан***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: igor23_81@ukr.net*

Результати експериментального дослідження сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів

Метою досліджень є підвищення ефективності попереднього та первинного решітного очищення зернового вороху, що отримуються після збирання врожаю комбайнами. Досягнення поставленої мети дозволить отримати якісне зерно для забезпечення як продовольчих потреб, так і подальшого використання для отримання насіннєвого матеріалу.

У статті викладені результати факторного експерименту з визначення ефективності сепарації зерна на дослідному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. Реалізуючи гіпотезу про можливість інтенсифікації внутрішньосферних процесів у оброблюваному зерновому матеріалі шляхом зміщення осей коливання і отворів решета, нами було виготовлено оригінальні решітні поверхні з продовговуватими отворами, розташованими зигзаговидно. Складено методику проведення і реалізовано факторний експеримент у вигляді центрального композиційного плану із зірковими точками. Після ранжування, було обрано найбільш впливові фактори на процес – питома подача $q_b(x_1)$, частота коливань $n(x_2)$ і кут відхилення осей отворів від осі решета $\beta(x_3)$. В результаті проведення експерименту встановлено, що найбільший вплив на якісні показники процесу мають питома подача та кут відхилення осей отворів від осі решета. Доведено, що найвищі показники ефективності сепарації $Y \approx 80\%$ досягаються при наступних параметрах: питома подача $q_b = 800 \dots 1150$ кг/м·год, частота коливань $n = 400 \dots 500$ кол./хв, кут відхилення осей отворів від осі решета $\beta \approx 10^\circ$.

зерно, решето, отвори, сепарація, ефективність

Постановка проблеми. Ключовими критеріями оцінки ефективності роботи зерноочисних машин є параметри технологічної ефективності – продуктивність, яка впливає на швидкість здійснення операції та ефект очистки (повнота розділення), що характеризує якість її виконання. Крім того, важливим показником ефективності роботи решітних сепараторів, який вказує на ступінь їх досконалості є показник питомої продуктивності (питома подача) на одиницю ширини, або площі решітної поверхні. Збільшення питомої подачі дозволяє підвищити продуктивність машини без зростання її габаритів, маси тощо, тобто інтенсифікувати процес сепарації.

Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоских коливальних решетах відомих сепараторів [1-6] відбувається шляхом активізації внутрішньосферних процесів у оброблюваному зерновому матеріалі під час виконання технологічного процесу, що забезпечує переміщення частинок, які підлягають просіюванню, у вертикальному та горизонтальному напрямках для створення умов проходження через отвори.

Активізація внутрішньосферних процесів може реалізуватися різними способами: створенням найбільш прийняттого кінематичного режиму коливань; використанням додаткових пристроїв-інтенсифікаторів; створенням умов невірноваженості, або нестійкої рівноваги часток на поверхні між отворами решіт (на поздовжніх перетинках); використанням ефекту зміщення осей коливання і отворів решета.

Перші два способи не можна визнати беззаперечно результативним, адже

кінематичний режим забезпечує активізацію внутрішньосферних процесів головним чином у вертикальному напрямку, тоді як активізуючі пристрої – у горизонтальному, причому останні додатково ускладнюють та підвищують вартість конструкції зерноочисного обладнання.

Третій спосіб активізації внутрішньосферних процесів, який реалізується шляхом використання запропонованого нами технічного рішення є гіпотезою, яка потребує перевірки, а процес – всебічного вивчення і проведення досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню питання інтенсифікації процесу сепарації зерна на решетах присвячено роботи багатьох вчених [1-20]. При цьому, розмаїття способів активізації внутрішньосферних процесів вказує на актуальність і невирішеність даної проблеми.

На створення найбільш прийняттого кінематичного режиму коливань – вібрацій було спрямовано зусилля Київської і Харківської шкіл решітної сепарації зернових матеріалів [1-5]. Авторами робіт наголошується, що підвищення частоти і зменшення амплітуди коливань дозволяє отримати необхідну віброгустину оброблюваного матеріалу для суттєвої активізації внутрішньосферних процесів і досягти при цьому значного приросту питомої подачі без зниження якості очищення зерна.

Однак, при цьому створюється нова проблема – суттєве збільшення забивання отворів решіт, яке окрім зниження якості сепарації, призводить ще й до пошкодження, або травмування зерна, знижуючи його цінність як сировини і як потенційного посівного матеріалу. Про масштабність даної проблеми говорять проведені глибокі дослідження, наведені в багатьох роботах О.І. Завгороднього і, зокрема, у його дисертаційному дослідженні [6].

Іншим шляхом активізації внутрішньосферних процесів є встановлення на решета додаткових пристроїв-сегрегаторів [7-14] – гребінок, рамок тощо, які при взаємодії з зерновим шаром розпушують його і перемішують, дозволяючи проходовим часткам з верхніх шарів потрапляти до отворів.

Недоліком даного рішення є зменшення площі живого перерізу решета, ускладнення конструкції додатковими компонентами, а також збільшення неврівноваженої маси, яка коливається і, як наслідок, може призводити до розбалансування механізму приводу при певних подачах.

Крім того, наведені вище способи дозволяють активізувати внутрішньосферні процеси, гарантовано інтенсифікуючи їх лише у поздовжній площині. При цьому зміщення та перемішування часток у поперечній площині носить випадковий характер і не дозволяє розкрити потенціали даних способів у повній мірі.

Певний крок до активізації внутрішньосферних процесів зроблено дослідниками [15-20] шляхом створення умов неврівноваженості, або нестійкої рівноваги часток на поверхні між отворами решіт. Цього ефекту вдалося досягнути шляхом створення конструкцій профільованих, пруткових (стрижневих), або струнних решіт [15-20].

Внаслідок того, що частинки, які знаходяться над перетинками, перебувають у неврівноваженому, або у стані нестабільної рівноваги, активно переміщуються у поперечному напрямку і швидко досягають отворів решета. Коливальний рух останнього [15, 16] активізує внутрішньосферні процеси у поздовжній площині. У випадку ж використання пасивних решіт з активним ротором [17-20], поздовжня активація непотрібна, оскільки останній забезпечує одношаровий рух зернового матеріалу.

Характерними недоліками наведеного способу активації внутрішньосферних процесів є підвищене забивання отворів, хоча і в меншій мірі, ніж у розглянутих вище.

Цікавий спосіб інтенсифікації процесу сепарації запропоновано авторським колективом під керівництвом М.В. Бакума [21]. Сутність способу полягає у наданні решітному полотну поперечних коливань, поряд з класичними – поздовжніми. При певних співвідношеннях амплітуд і частот поздовжніх та поперечних коливань,

безперечно відбудеться активізація внутрішньосарових процесів у згаданих площинах, що дозволить підвищити показники технологічної ефективності.

Недоліком запропонованого способу, на нашу думку є очевидна складність приводу такого решітного стану і надійність роботи, особливо в складі пересувних зерноочисних машин.

Більш простий спосіб активізації внутрішньосарових процесів запропоновано колективом вчених під керівництвом С.О. Харченка [22, 23], у якому активізація внутрішньосарових процесів досягається специфічними виштамповками та вирізами-канавками, які починаються у площині отворів і спрямовані у бік поздовжніх перетинок. Завдяки їх наявності, частки, що знаходяться над поздовжніми перетинками потрапляють до канавок і спрямовуються до отворів.

Даний спосіб дозволяє мінімізувати зміни конструкцій решітних сепараторів і механізмів їх приводу, оскільки удосконалення, що дає ефект – це лише решітне полотно. Недоліками даної конструкції є відносна складність виготовлення решета, оскільки штампування малих за розмірами вирізів-канавок вимагає прецизійної точності обладнання. Крім того, відсутні дані щодо надійності і довговічності таких решіт.

На основі аналізу наведених наукових праць, на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено [24, 25] і виготовлено решітні полотна (рис.1), які мають просту конструкцію і дозволяють активізувати внутрішньосарові процеси у зерновому матеріалі.

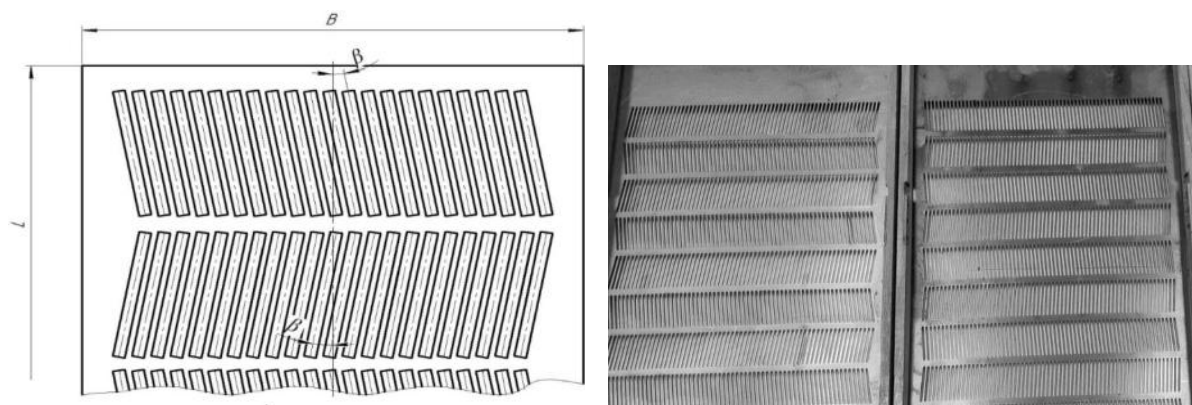


Рисунок 1 – Схема і загальний вигляд дослідних решітних полотен із зигзаговидними отворами
Джерело: розроблено із використанням [24, 25]

Характерною відмінністю оригінальних решіт від існуючих є відхилення осей отворів від осі решета, що дозволяє отримати певне поперечне відхилення від напрямку коливань. Використання таких отворів дозволяє всім часткам, що знаходяться в процесі обробки над поперечними перетинками потрапити до отворів, при цьому інтенсифікувати як поздовжнє, так і поперечне перемішування маси.

Дана конструкція є оригінальною, тому для підтвердження гіпотези про ефективність її роботи потребує проведення всебічного дослідження.

Постановка завдання. Основним завданням роботи є експериментальне виявлення залежності повноти розділення зернової маси на оригінальному решітному полотні коливального сепаратора від питомої подачі та основних конструктивних параметрів пристрою і підтвердження гіпотези про підвищення ефективності виділення домішок при зигзаговидному розташуванням отворів.

Виклад основного матеріалу. Удосконалення процесу сепарації зернових сумішей на плоских коливальних решетах ґрунтується на інтенсифікації внутрішньосарових процесів на етапі руху матеріалу по поверхні решета і розділення компонентів зерноsumіші на прохідну та непрохідну фракції. Основною задачею

експериментальних досліджень, що наведені в даній роботі є перевірка ефективності роботи плоских коливальних решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів. Експериментальні дослідження по оцінці якості роботи плоских коливальних решіт проводилися із використанням лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A (рис. 2). Вибір зазначеного лабораторного сепаратора обумовлено тим, що саме він забезпечує можливість відтворення технологічних режимів, з якими працюють зерноочисні машини загального призначення в реальних умовах. Враховуючи те, що під час експериментів було заплановано оцінити вплив подачі, частоти коливань решета та кута відхилення осей отворів від осі решета, лабораторний сепаратор працював із одним встановленим решетом, розділяючи при цьому ворох на прохідну і непрохідну фракції.

Перед реалізацією експериментальних досліджень проводилася підготовка як експериментальної установки так і дослідних зразків. На початковому етапі робіт проведено калібрування сепаратора щодо продуктивності подачі зернового вороху на очищення, кута нахилу решітного стану, амплітуди та частоти коливання [25]. Для проведення досліджень використовували зерновий ворох озимої пшениці природної вологості врожаю 2025 року, який отримано після зернозбирального комбайна класичної схеми обмолоту. З метою виключення забивання отворів решіт та для підвищення однорідності і точності експериментів, з вороху попередньо видаляли частки, які застрягали в отворах при підготовці матеріалу до експериментальних досліджень. Це дозволило скоротити загальний час на проведення експериментів. Крім того, контролювали вміст прохідної фракції, що може досягати до 10% і є характерним для зернових матеріалів із якими працюють зерноочисні машини загального призначення.

Для вивчення впливу основних факторів на ефективність сепарації застосовувалась методика планування багатофакторного експерименту у вигляді центрального композиційного плану із зірковими точками [26], що було реалізовано в пакеті програм STATISTICA 12. Центральний композиційний план включає повний факторний експеримент, центральні точки та зіркові точки, що дозволяє дослідити нелінійні взаємодії між факторами. Повторюваність дослідів є трикратною, а для подальших розрахунків приймалося середнє значення, за умови якщо під час проведення досліджень різниця між результатами експериментів не перевищувала 10%. На основі аналізу теоретичних досліджень та попередніх експериментів обрано три фактори, рівні значимості яких представлені в таблиці 1. Серед найбільш впливових факторів виділено:

- питому подачу матеріалу q_b (x_1), кг/(м·год), яка загалом визначає продуктивність сепаратора та характеризує інтенсивність навантаження на решітну поверхню;

- частоту коливань n (x_2), кол/хв, що регулює вертикальну сегрегацію частинок і їх переміщення по решету;

- кут відхилення осей отворів від повздовжньої вісі решета β (x_3), град – фактор, який визначає інтенсивність поперечного переміщення часток у площині решета.

В якості критерію оптимізації Y обрано повноту виділення домішок із зернового вороху, що в своїй сукупності і характеризує загальну якість процесу сепарації плоским решетом сепаратора. Відповідно до центрального композиційного плану проведено 16 експериментів, результати яких наведено в таблиці 2.

Після обробки експериментальних даних методами регресійного аналізу в програмі STATISTICA 12 отримано оцінки коефіцієнтів моделі та їх статистичну значущість у вигляді табличного результату (рис. 3), Парето-карту (рис. 4), графіки попарного впливу факторів на критерій оптимізації і лінії рівного виходу (рис. 5) та профілі бажаності факторів (рис. 6).

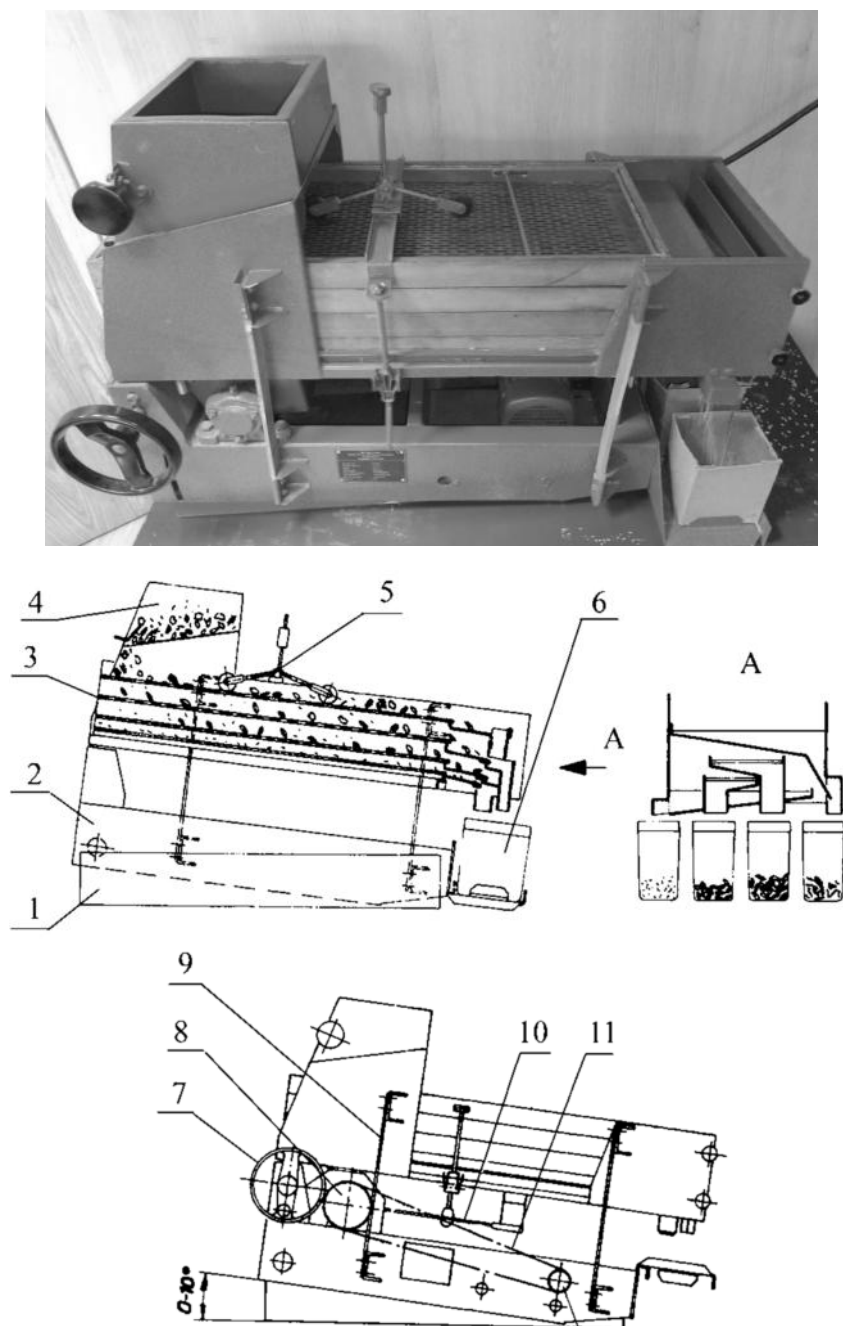


Рисунок 2 – Загальний вигляд та схема лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A:

- 1 – рама сепаратора; 2 – кузов; 3 – грохот; 4 – бункер-завантажувач;
- 5 – механічний струшувач-очисник решета; 6 – ємкості для розділених фракцій вороху;
- 7 – маховик регулювання кута нахилу кузова сепаратора; 8 – ексцентрик механізму приводу;
- 9 – підвіска грохота сепаратора; 10 – шатун; 11 – механізм приводу

Джерело: розроблено із використанням [1, 5, 26]

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів експериментальних досліджень

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Нижній (-)	Верхній (+)	
1	Питоме подача q_b , кг/м·год.	x_1	800	1500	350
2	Частота коливань n , кол/хв	x_2	300	500	100
3	Кут відхилення осей отворів від осі решета β , град.	x_3	0	10	5

Джерело: розроблено автором

Аналіз наведених результатів (рис. 3, 4, 5, 6) дозволяє отримати статистичну модель яка у поліноміальному вигляді наступна:

$$Y = 60,525 - 7,054 \cdot x_1 + 3,824 \cdot x_2 + 5,596 \cdot x_3 + 0,824 \cdot x_1^2 + 1,363 \cdot x_2^2 + 2,97 \cdot x_3^2 - 0,417 \cdot x_1 x_2 + 1,95 \cdot x_1 x_3 - 0,595 \cdot x_2 x_3.$$

Таблиця 2 – Матриця та результати експериментальних досліджень

q_b , кг/м·год	n , кол/хв	β , град	Y , %
800	300	0	68,1
800	300	10	77,19
800	500	0	74,65
800	500	10	80,4
1500	300	0	51,97
1500	300	10	67,9
1500	500	0	55,89
1500	500	10	70,4
1150	400	5	64,2
600	400	5	70,1
1700	400	5	46,5
1150	200	5	52,1
1150	600	5	74,6
1150	400	0	51
1150	400	11	64
1150	400	5	64,2

Джерело: розроблено автором

Effect Estimates; Var.:Y; R-sqr=.81684; Adj.:.5421 (3-16-1.sta) 3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=48,87478 DV: Y										
Factor	Effect	Std Err.	t(6)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	60,5253	4,655869	12,99979	0,000013	49,1328	71,91784	60,52534	4,655869	49,1328	71,91784
(1)q, кг/м*год(L)	-14,1073	3,887101	-3,62926	0,010975	-23,6187	-4,59593	-7,05366	1,943550	-11,8094	-2,29796
q, кг/м*год(Q)	1,6471	4,860068	0,33889	0,746235	-10,2451	13,53921	0,82353	2,430034	-5,1226	6,76960
(2)n, кол/хв(L)	7,6475	3,495525	2,18780	0,071291	-0,9057	16,20074	3,82375	1,747762	-0,4529	8,10037
n, кол/хв(Q)	2,7270	3,191841	0,85435	0,425701	-5,0832	10,53711	1,36348	1,595921	-2,5416	5,26855
(3)β, град(L)	11,1912	4,238947	2,64008	0,038536	0,8188	21,56351	5,59559	2,119473	0,4094	10,78175
β, град(Q)	5,9418	6,837882	0,86896	0,418268	-10,7899	22,67353	2,97092	3,418941	-5,3949	11,33676
1L by 2L	-0,8350	4,943419	-0,16891	0,871417	-12,9311	11,26111	-0,41750	2,471709	-6,4656	5,63055
1L by 3L	3,9000	4,943419	0,78893	0,460182	-8,1961	15,99611	1,95000	2,471709	-4,0981	7,99805
2L by 3L	-1,1900	4,943419	-0,24072	0,817784	-13,2861	10,90611	-0,59500	2,471709	-6,6431	5,45305

Рисунок 3 – Табличний результат проведених експериментальних досліджень

Джерело: розроблено автором

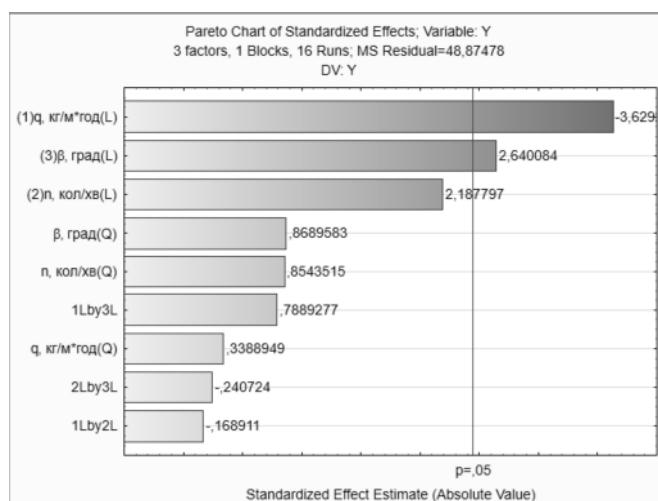


Рисунок 4 – Парето-карта (межа статистичного значення коефіцієнту математичного чекання)
Джерело: розроблено автором

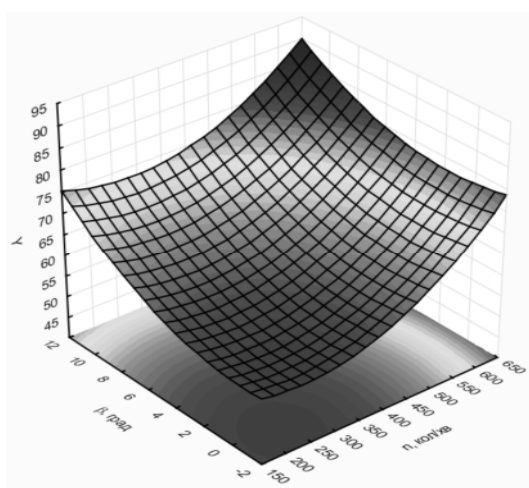
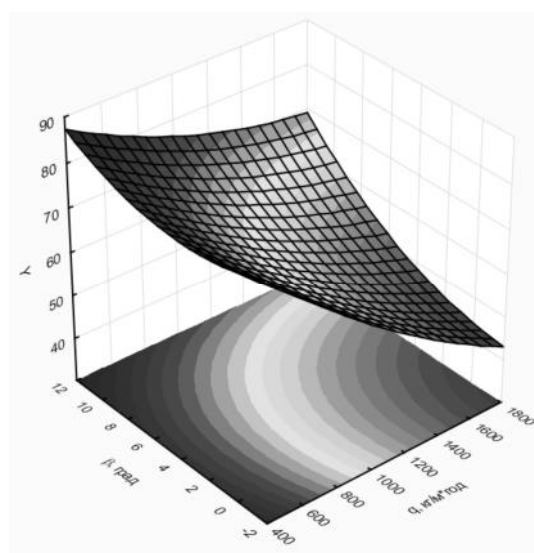
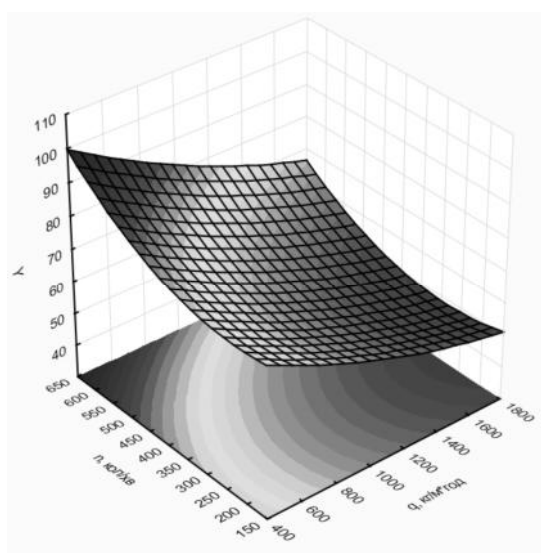


Рисунок 5 – Графіки попарного впливу факторів на критерій оптимізації і лінії рівного виходу
Джерело: розроблено автором

В результаті проведення експерименту встановлено, що найбільший вплив на якісні показники процесу мають питома подача та кут відхилення осей отворів від осі решета (рис. 4, 6). Взаємодія між факторами не мала статистично значущого впливу, що підтверджує їхній домінуючий окремий ефект.

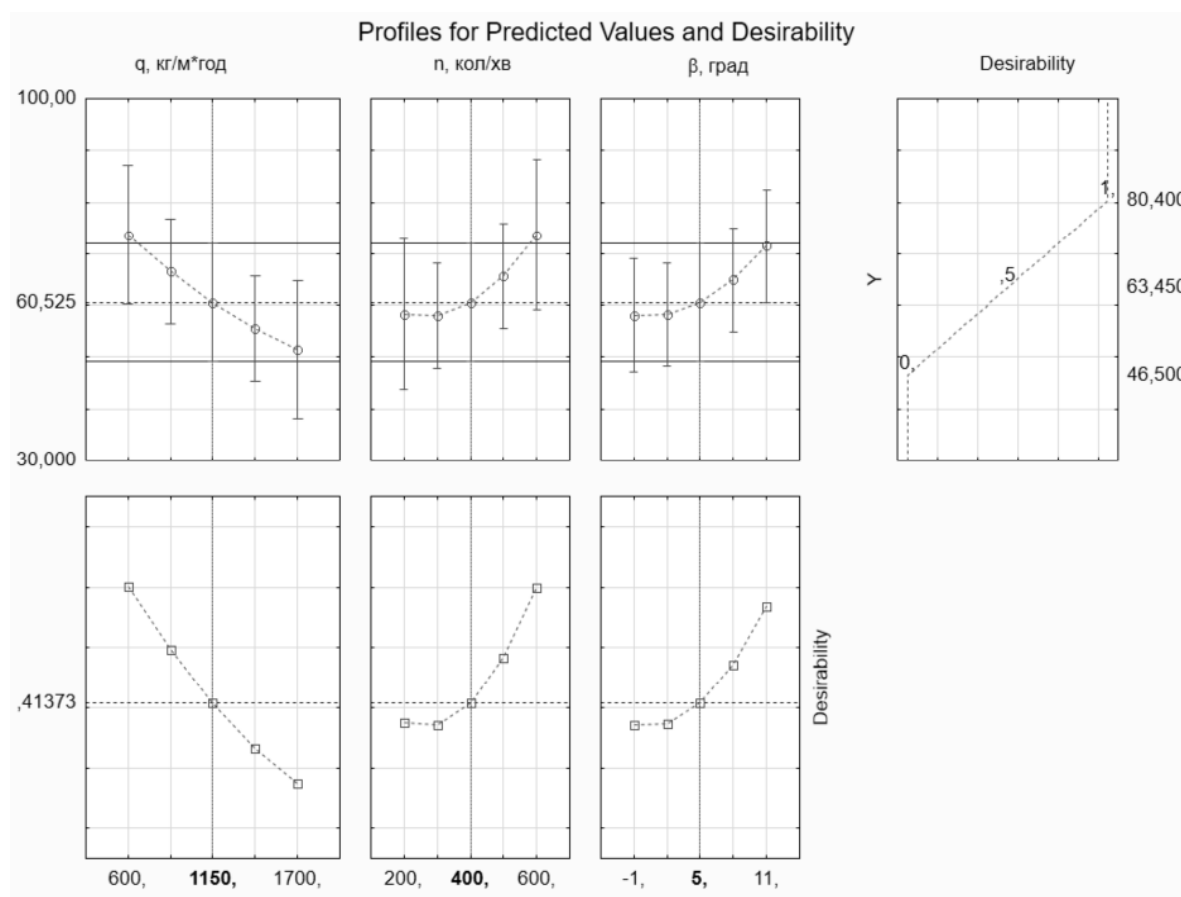


Рисунок 6 – Профілі бажаності факторів

Джерело: розроблено автором

Аналіз наведених результатів досліджень дозволяє відмітити: підвищення питомої подачі q_b призводить до зниження ефективності очищення Y , що є очікуваним результатом. Зі збільшенням подачі від 600 до 1700 кг/м³·год ефективність роботи решета знижувалася (рис. 5 а, б, 6). Це пояснюється перевантаженням робочої поверхні і зниженням селективності відбору зернової суміші. Найвищі значення Y (74...80%) досягаються при питомій подачі $q_b = 800...1150$ кг/м³·год, тоді як при $q_b = 1700$ кг/м³·год ефективність знижувалася до 46...52%.

Поряд з цим, підвищення частоти коливань n та кута відхилення осей отворів від осі решета β сприяють покращенню показника повноти виділення домішок. Зростання частоти від 200 до 600 кол/хв сприяє підвищенню ефективності (рис. 5 а, в). При цьому середні значення Y зростали від 52% (200 кол/хв) до 75% (500 кол/хв). Найбільш раціональним є діапазон 400...500 кол/хв, що забезпечує стабільно високі результати сепарації.

Зміна кута нахилу в діапазоні від 0° до 10° показала достатньо суттєвий вплив на критерій оптимізації (рис. 4). При $\beta \approx 10^\circ$ ефективність досягає максимальних значень (77...80%). При менших кутах (0...5°) ефективність була нижчою (64...70%).

Висновки. 1. З метою інтенсифікації роботи плоских коливальних решіт зерноочисних машин загального призначення найбільш доцільно забезпечити активізацію внутрішньосферних процесів компонентів зернової суміші, що розділяються, зокрема за рахунок виконання на робочій поверхні решіт продовговуватих отворів із зигзаговидним розташуванням.

2. Результати експериментальних досліджень підтверджують гіпотезу про ефективність використання зигзаговидного розташування отворів решета. При збільшенні кута відхилення від 0° до 10° повнота виділення домішок зростає в середньому на 8...16% залежно від інших умов експерименту.

3. Найвищі показники ефективності сепарації $Y \approx 80\%$ досягаються при наступних параметрах: питома подача $q_b = 800...1150$ кг/м·год, частота коливань $n = 400...500$ кол./хв, кут відхилення осей отворів від осі решета $\beta \approx 10^\circ$.

Список літератури

1. Тищенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Харків, 2004. 403 с.
2. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин*. 2003. Вип. 33. С. 53–59.
3. Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. Т. 2, № 1. С. 17–22.
4. Bracasescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K. C. Researches Concerning Impurities Separation Process from Mass of Cereal Seeds Using Vibrating Sieves in Air Flow Currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.
5. Богомолів О. В. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 1. С. 47–51.
6. Завгородній О. І. Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Харків : Харк. держ. техн. ун-т с. г., 2001. 37 с.
7. Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Вип. 115. С. 112–117.
8. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Глеваха, 2008. 21 с.
9. Степаненко С. П. Аналіз взаємодії пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для с.-г. України: зб. наук. пр.* Дослідницьке, 2005. Вип. 8 (22), кн. 2. С. 290–297.
10. Степаненко С. П. Вплив параметрів пасивних розпушувачів на ефективність вібропневматичної сепарації зерна. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2006. Вип. 41. С. 153–160.
11. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Theoretical Research of Separation Process Grain Mixtures. *Tekhnika Ta Energetika*. 2019. Т. 10, № 4. Р. 137–143.
12. Решето : пат. 82093 Україна : МПК В07В 1/00. № у 2012 14385 ; заявл. 17.12.2012 ; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
13. Решето з прямокутними отворами : пат. 55286 Україна : МПК В07В 1/00, А01В 76/00. № у 2010 06635 ; заявл. 31.05.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
14. Тищенко Л. М., Ольшанський В. П., Харченко Ф. М., Харченко С. О. Моделювання динаміки зернової суміші при сепарації на рифленому решеті вібросепаратора. *Інженерія природокористування*. 2014. № 2 (2). С. 134–137.
15. Решето Фадеева : пат. 37527 Україна : МПК В07В 1/46. № у 2008 09604 ; заявл. 22.07.2008 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.
16. Васильковський О. М., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 52–58.
17. Васильковський О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.

18. Васильковський О. М., Мачок Ю. В. Аналіз способів інтенсифікації процесу сепарації зернових матеріалів на решетах. *Крамаровські читання: матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф.* Київ : НУБіП України, 2018. С. 127–129.
19. Лузан П. Г., Васильковський О. М. Нові конструкції решіткових сепараторів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 27. С. 123–127.
20. Мороз С. М., Васильковський М. І., Васильковський О. М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. *Збірник наук. пр. КНТУ. Техніка в с.-г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2004. Вип. 14. С. 72–78.
21. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на решетах з прямокутними отворами : пат. 84498 Україна : МПК В07В 1/00. № у 2013 04561 ; заявл. 11.04.2013 ; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.
22. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах : пат. 50874 Україна : МПК В07В 1/00. № у 2009 13683 ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.
23. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на штампованих решетах : пат. 58042 Україна : МПК В07В 1/28. № у 2010 11203 ; заявл. 20.09.2010 ; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 16.
24. Плоске решето : пат. 154304 Україна : МПК 01F12/00, В07В13/02. № у 2023 02258 ; заявл. 12.05.2023 ; опубл. 01.11.2023, Бюл. № 44.
25. Бажан І. М., Васильковський О. М., Лещенко С. М., Амосов В. В. Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2024. Вип. 54. С. 192–202.
26. Підручник дослідника : навч. посіб. для студентів агротехнічних спеціальностей / О. Васильковський, С. Лещенко, К. Васильковська, Д. Петренко. Харків : Мачулін, 2016. 204 с.

References

1. Tishchenko, L. M. (2004). *Scientific foundations of vibrocentrifugal separation processes of grain mixtures* (Candidate's thesis). Kharkiv [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Pastushenko, M. H. (2003). *Trends in the development of designs of machines and equipment for cleaning and sorting grain materials. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (33), 53–59 [in Ukrainian].
3. Olshanskyi, V. P. (2017). *On the movement of a heterogeneous fine-grained mixture on a flat vibrating sieve. Engineering of Processing and Food Productions*, 2(1), 17–22 [in Ukrainian].
4. Bracacescu, C., Gageanu, I., Popescu, S., & Selvi, K. C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*, Jelgava, 364–370.
5. Bohomolov, O. V. (2017). *Analysis of separator designs for separation of hard-to-separate grain mixtures. Engineering of Processing and Food Productions*, (1), 47–51 [in Ukrainian].
6. Zavorodnii, O. I. (2001). *Scientific foundations of processes of cleaning sieve openings of grain cleaning machines* (Doctoral thesis). Kharkiv: Kharkiv State Technical University of Agriculture [in Ukrainian].
7. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Kalinichenko, R. A. (2007). *Theoretical substantiation of grain particle movement on a vibropneumosieve under the action of loosening working bodies. Scientific Bulletin of the National Agrarian University*, (115), 112–117 [in Ukrainian].
8. Stepanenko, S. P. (2008). *Improving the efficiency of vibropneumatic grain separators* (Extended abstract of candidate's thesis). Hlevakha [in Ukrainian].
9. Stepanenko, S. P. (2005). *Analysis of the interaction of a passive loosener with a vibrofluidized grain layer. In Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture of Ukraine* (Vol. 8/22, Book 2, pp. 290–297). Doslidnytske [in Ukrainian].
10. Stepanenko, S. P. (2006). *Influence of passive loosener parameters on the efficiency of vibropneumatic grain separation. Proceedings of Tavria State Agrotechnical Academy*, (41), 153–160 [in Ukrainian].
11. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Tekhnika Ta Energetika*, 10(4), 137–143.
12. *Resheto* [Sieve]: Patent 82093 Ukraine: IPC B07B 1/00. No. u 2012 14385; filed 17.12.2012; published 25.07.2013, Bulletin No. 14 [in Ukrainian].
13. *Resheto with rectangular holes*: Patent 55286 Ukraine: IPC B07B 1/00, A01B 76/00. No. u 2010 06635; filed 31.05.2010; published 10.12.2010, Bulletin No. 23 [in Ukrainian].
14. Tishchenko, L. M., Olshanskyi, V. P., Kharchenko, F. M., & Kharchenko, S. O. (2014). *Modeling the dynamics of grain mixture during separation on a corrugated sieve of a vibroseparator. Environmental Engineering*, 2(2), 134–137 [in Ukrainian].
15. *Fadeev's sieve*: Patent 37527 Ukraine: IPC B07B 1/46. No. u 2008 09604; filed 22.07.2008; published 25.11.2008, Bulletin No. 22 [in Ukrainian].

16. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., & Nesterenko, O. V. (2020). *Towards the creation of the concept of an "ideal" sieve of a grain separator. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (50), 52–58 [in Ukrainian].
17. Vasylovskiy, O. M. (2001). *Development of design and substantiation of parameters of a centrifugal grain sieve separator* (Extended abstract of candidate's thesis). Kirovohrad [in Ukrainian].
18. Vasylovskiy, O. M., & Machok, Yu. V. (2018). *Analysis of methods for intensifying the separation process of grain materials on sieves*. In *Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference "Kramarov Readings"* (pp. 127–129). Kyiv: NUBiP of Ukraine [in Ukrainian].
19. Luzan, P. H., & Vasylovskiy, O. M. (1999). *New designs of sieve separators. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (27), 123–127 [in Ukrainian].
20. Moroz, S. M., Vasylovskiy, M. I., & Vasylovskiy, O. M. (2004). *Substantiation of rod diameters of a bar sieve. Collection of Scientific Papers of KNTU. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (14), 72–78 [in Ukrainian].
21. *Method of intensifying the separation of seed mixtures on sieves with rectangular holes*: Patent 84498 Ukraine: IPC B07B 1/00. No. u 2013 04561; filed 11.04.2013; published 25.10.2013, Bulletin No. 20 [in Ukrainian].
22. *Method of intensifying the separation of seed mixtures on flat sieves*: Patent 50874 Ukraine: IPC B07B 1/00. No. u 2009 13683; filed 28.12.2009; published 25.06.2010, Bulletin No. 12 [in Ukrainian].
23. *Method of intensifying the separation of seed mixtures on stamped sieves*: Patent 58042 Ukraine: IPC B07B 1/28. No. u 2010 11203; filed 20.09.2010; published 25.03.2011, Bulletin No. 16 [in Ukrainian].
24. *Flat sieve*: Patent 154304 Ukraine: IPC 01F12/00, B07B13/02. No. u 2023 02258; filed 12.05.2023; published 01.11.2023, Bulletin No. 44 [in Ukrainian].
25. Bazhan, I. M., Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., & Amosov, V. V. (2024). *Intensification of the grain separation process on a flat oscillating sieve with zigzag hole arrangement. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (54), 192–202 [in Ukrainian].
26. Vasylovskiy, O., Leshchenko, S., Vasylovska, K., & Petrenko, D. (2016). *Researcher's textbook: Manual for students of agrotechnical specialties*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].

Ihor Bazhan

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Results of the Experimental Study on Grain Separation Using a Flat Oscillating Sieve with Zigzag-Shaped Hole Arrangement

The aim of the research is to increase the efficiency of preliminary and primary screening of grain heaps obtained after harvesting by combines. Achieving this goal will allow obtaining high-quality grain to meet both food needs and further use for obtaining seed material.

The study presents the results of experimental research based on multifactor planning methodology in the form of a central composite design with star points, implemented in the STATISTICA 12 software package. Experimental tests were carried out on the Petkus Wutha K 294 A laboratory separator, which enabled simulation of operational conditions typical for industrial grain cleaning machines. The effects of specific feed rate (q_b), oscillation frequency (n), and the angle of deviation of hole axes from the sieve axis (β) on separation efficiency were examined. It was found that the most influential factors are feed rate and the deviation angle. Increasing β from 0° to 10° resulted in an average efficiency growth of 8...16%. The best separation results ($Y \approx 80\%$) were achieved at $q_b = 800...1150 \text{ kg/m}\cdot\text{h}$, $n = 400...500 \text{ oscillations/min}$, and $\beta \approx 10^\circ$. The experiments confirmed the hypothesis that the original sieve design with zigzag-arranged oblong holes activates intralayer processes in both longitudinal and transverse directions, leading to process intensification and improved cleaning performance.

The conclusions emphasize that intensification of intralayer processes on flat oscillating sieves is the key factor in improving separation efficiency. The zigzag arrangement of holes ensures a more uniform distribution of the grain layer, enhances impurity removal conditions, and reduces surface overloading. The experimental results are of practical importance for the improvement of grain cleaning machine designs and can be applied in the development of new sieve separators. The proposed technical solution combines simplicity of implementation with high efficiency, confirming its feasibility for industrial application.

grain, sieve, holes, separation, efficiency

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 621.77.01

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.175-186](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.175-186)**О. В. Іванкова**, доц., канд. техн. наук, **В. О. Федін***Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua, vitalii.fedin@pdau.edu.ua*

Дослідження відновлення деталей шестеренних насосів пластичним деформуванням

Відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки дає змогу суттєво скоротити час простою машин, а також підвищити якість ремонту та позитивно впливати на показники довговічності машин. На зараз існує потреба в дослідженнях використання технологій, що ґрунтуються на пластичній деформації у ремонті конкретних деталей. Актуальним наразі є аналіз можливості застосування пластичного деформування у відновленні зношених втулок шестеренних насосів гідросистем автотракторної техніки. Для цього дослідили залежність зміни об'єму втулки від зміни її геометричних параметрів при відновленні пластичним деформуванням (осадженням).

У статті представлено результати досліджень по підвищенню ефективності технічного сервісу гідравлічних систем автотракторної техніки шляхом вдосконалення технології відновлення втулок шестеренних насосів методом пластичної деформації, з урахуванням закономірностей зношування та об'ємних характеристик деталей. Приведені результати техніко-аналітичного огляду конструкції та функціональних характеристик шестеренних насосів як елементів гідравлічних систем. Проаналізовано закономірності зношування втулок на основі мікрометричних досліджень. Розроблена методика геометричного моделювання втулок та здійснено розрахунок їх об'ємних параметрів. Досліджено залежність об'єму втулок від величини зносів втулок по висоті та по внутрішньому діаметру. Встановлена залежність зміни об'єму втулки від зміни її розмірів. Побудована аналітична модель залежності об'єму втулки від основних геометричних параметрів. Обґрунтована доцільність використання способу осаджування як ефективного інженерного рішення при відновленні конкретних деталей, а саме, втулок шестеренних насосів гідравлічних систем автотракторної техніки.

насос, відновлення, довговічність, зношування, об'єм, пластичне деформування, осаджування.

Постановка проблеми. Деталі тракторів, автомобілів та іншої техніки працюють в умовах знакозмінних навантажень та часто піддаються інтенсивному тертю. Якщо розглядати гідравлічні системи техніки, то у таких режимах працює переважна більшість деталей. Тому, для саме таких деталей потрібно розробити технології відновлення розмірів та зміцнення поверхонь, які найбільш інтенсивно зношуються [1, 2, 3].

Методи, що ґрунтуються на використанні пластичної деформації, можуть ефективно застосовуватися для відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. Технології, які включають пластичне деформування сприяють формуванню зносостійкої поверхневої структури, практично не дають зону термічного впливу, мають високі економічні та екологічні параметри.

При розробці технологій відновлення із застосуванням пластичного деформування нас насамперед цікавить характер деформації: характер напружено-деформованого стану матеріалу деталей, вплив на нього параметрів технологічного процесу [4].

У дослідженнях по розробці технології відновлення зношених деталей розглядаються процеси осаджування та роздачі деталей типу втулок. Суть процесу осаджування втулок полягає у тому, що компенсація зношеного шару матеріалу буде здійснюватися зменшенням висоти втулки. Отже, при розробці осаджуванні деталей-втулок важливим є вивчення залежності об'єму втулки від параметрів режимів обробки.

Вивчення характеру деформації зразків-втулок у відповідності зі зміною параметрів деформування забезпечується використанням методів дослідження: аналітичних

(розрахункових), експериментальних, методів, які ґрунтуються на імітаційному моделюванні [5]. Було вирішено, що для дослідження залежності зміни об'єму втулки від зміни параметрів обробки при осаджуванні деталей застосувати комбіновані експериментально-розрахункові методи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методи та способи підвищення надійності техніки постійно цікавлять як виробників, так і науковців. Значна кількість досліджень видатних науковців мають напрямок на підвищення надійності машин. Дані літературних джерел містять результати проведених досліджень у галузі відновлення зношених деталей машин та зміцнення їх поверхонь, що приводить до підвищення надійності та довговічності машин [6, 7, 8]. Висновки по застосуванню у технічному сервісі технологій ремонту із зміцненням деталей базуються на ґрунтовному аналізі теоретичних, розрахункових досліджень, а також результатів практичних випробувань.

Щодо застосування технологій з використанням пластичної деформації, то в літературі є досить багато даних по використанню їх у машинобудуванні та у технічному сервісі. Переважно висвітлюють технології обробки із застосуванням пластичного деформування окремих деталей. І, переважно, при виготовленні деталей машин. Пластичне деформування у технічному сервісі при відновленні зношених деталей, на нашу думку, не мають достатнього висвітлення у літературі.

Здійснення пластичного деформування можливе через різноманітні схеми навантаження. Питання міцності, пластичності, впливу напружено-деформованого стану, дії залишкових внутрішніх напружень висвітлюються в багатьох наукових роботах.

Дослідженнями трибофізичних основ підвищення довговічності автотранспортної та сільськогосподарської техніки займається професор Аулін В.В. [5]. Також, науковці під його керівництвом працюють над розробкою технологій відновлення зношених деталей Трибофізичні властивості матеріалів деталей та трибофізичні явища при здійсненні пластичної деформації є одним з основних факторів, які впливають на перебіг пластичної деформації.

Вивчають закономірності розвитку немонотонної пластичної деформації при обробці металів тиском багато науковців у співпраці з виробниками. Основною метою таких досліджень є розробка оцінки напружено-деформованого стану деталей. Науковці: Р. І. Сивак, В. А. Огородніков, Т. Ф. Архіпова мають значні напрацювання у цій галузі [6].

Вивчення процесів зміцнення поверхневим пластичним деформуванням циліндричних довгомірних деталей, зокрема залізничних вагонів проводять Афтаназів І., Шевчук Л., Строган О. [8].

Питаннями деформуванням сталевих та бронзових деталей займаються науковці школи професора Дуднікова А.А. Основним напрямком досліджень є підвищення надійності деталей при їх відновленні із застосуванням вібраційного деформування [9].

Механізми протікання процесів локального деформування матеріалів завжди викликали надзвичайне зацікавлення науковців. Ці питання в своїх працях досліджують науковці Матвийчук В. А., Михалевич В. М. та інші [10, 11]. Сивак Р. І з колегами проводять дослідження напружено-деформованого стану порожнистих виробів [12, 13, 14]. Ними розроблені критерії оцінки рівня деформованості металу при прямому і зворотному витискуванні при штампуванні металевих зразків.

Залишкові внутрішні напруження, що виникають в процесі деформування деталей мають значний вплив на результат деформування. Визначення залишкових напружень – дуже важлива задача. Над розв'язанням її працює багато науковців [14, 15].

У теорії та практиці використання пластичного деформування одним з найменш вивчених питань залишається характер деформації при відновленні, а також залежності зміни об'єму втулки від зміни режимів деформування.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності технічного сервісу гідравлічних систем автотракторної техніки шляхом вдосконалення технології відновлення втулок шестеренних насосів методом пластичної деформації, з урахуванням закономірностей зношування та об'ємних характеристик деталей. Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Провести техніко-аналітичний огляд конструкції та функціональних характеристик шестеренних насосів як елементів гідравлічних систем.
2. Ідентифікувати закономірності зношування втулок на основі мікрометричних досліджень з метою встановлення типових дефектів та критичних зон втрат металу.
3. Розробити методику геометричного моделювання втулок з подальшим розрахунком їх об'ємних параметрів на основі складових геометричних фігур.
4. Побудувати аналітичну модель залежності об'єму втулки від основних геометричних параметрів (висоти та внутрішнього радіуса) з метою прогнозування металовитрат у процесі відновлення.
5. Обґрунтувати доцільність використання способу осаджування як ефективного інженерного рішення при відновленні торцевих поверхонь втулок.
6. Розробити рекомендації щодо удосконалення ремонтних процесів на основі отриманих емпіричних та теоретичних результатів

Виклад основного матеріалу. Шестерний насос - універсальний пристрій, який є невід'ємною частиною гідравлічних машин. Він призначений для перекачування рідин різної в'язкості: мастил, палива та інших.

За рахунок обертання двох шестерень створюється рівномірний потік без перепадів тиску, що забезпечує стабільну подачу рідини. Завдяки простоті конструкції шестеренні насоси мають досить тривалий термін служби. Легко розбираються для діагностики та ремонту; можлива швидка заміна окремих частин без складного сервісного обслуговування [1, 2].

Схема роботи шестеренного насосу: в корпусі ведуча та ведена шестерні однакової довжини, знаходяться в зачепленні одна з одною. Зазор між шестернями повинен бути мінімальним. Торцеві поверхні шестерень прилягають до стінок корпусу. Рідина, яка перекачується заповнює впадини між зубцями шестерень, звідти перетікає по внутрішній поверхні корпусу у порожнину нагнітання.

Робоча рідина може витікати через зазори між корпусом та вершинами зубців шестерень, а також між їх торцями та боковими стінками корпусу. Протікання можуть утворюватися по лінії контакту зубців. Усі види втрат рідини враховуються через коефіцієнт корисної дії насосу, максимальне значення якого знаходиться в межах 0,8...0,95 [3, 4]. Щоб досягнути таких значень, необхідно знизити торцеві витікання. Для цього бічні стінки автоматично притискаються до поверхонь торців шестерень робочою рідиною під дією робочого тиску

Основні несправності шестеренних насосів: наявність граничних зносів деталей, порушення регулювань агрегатів. Основними видами зношування деталей гідроагрегатів є: абразивний та гідроабразивний. Саме це, та ще старіння гумових ущільнень вузлів призводить до утворення протікань робочої рідини, через що падає об'ємний коефіцієнт корисної дії.

Розбирання негативно впливає на герметичність з'єднань шестеренних насосів, і знижує довговічність його вузлів. Тому технічний стан агрегатів гідросистеми встановлюють переважно шляхом діагностування на спеціальних стендах. Якщо під час випробування коефіцієнт подачі насоса виявиться меншим за показник 0,65, то насос необхідно ремонтувати.

Насоси шестеренного типу можуть отримувати зноси стінок колодязів корпусу з боку камери всмоктування з шестернями, втулками, опорною поверхнею під втулками, а також з поверхнями під ущільнювальною манжетою. Також можуть утворюватися

раковини, і, навіть тріщини на поверхні деталей, зрив чи зноси різьби під болти кріплення кришок та муфт до корпусу.

Для недопущення падіння коефіцієнта корисної дії насоса важливим є задача зниження торцевих протікань. Втулки призначені для ущільнення торців шестерень насоса. Лиски втулок відділяють камери нагнітання і всмоктування. Корпус і зовнішня поверхня розмежовують камеру всмоктування і камеру високого тиску. Втулки насоса виконують також функцію підшипників, у яких обертаються цапфи шестерень. Тому, якість відновлення втулок має велике значення, так, як безпосередньо впливає на ресурс відремонтованого насоса [2, 4].

Втулки шестеренних насосів, виготовляються з алюмінієвих сплавів, зокрема, зі сплаву АМО 3-7 (ISO 209-1) [1]. Працюючи в парі із сталевими шестернями, втулки часто мають вплив агресивного середовища, сприймають знакозмінні навантаження і температурні перепади. Через це утворюються внутрішні термічні напруження, які, в купі з іншими факторами приводить до нерівномірного зношування поверхонь тертя цих деталей з утворенням задирів та натирань.

Основними видами зношування втулок є: зношування поверхні торця втулки, яка є спряженою з шестернею, зношування: внутрішньої циліндричної поверхні, малої циліндричної поверхні хвостовика втулки, зношування великої циліндричної поверхні і малої торцевої поверхні в спряженні з ущільнювальною манжетою та корпусом насоса.

На роботоздатність і довговічність шестеренного насоса після ремонту безпосередній вплив має якість відновлення його деталей.

У практиці технічного сервісу широко використовується декілька способів відновлення втулок шестеренних насосів: 1- переплавленням, 2 – нарощуванням, 3 - пластичним деформуванням [4, 7, 9].

Відновлення переплавленням втулок, які були вибракувані зараз використовується досить широко. Але переплавлення має недоліки: суттєві витрати на електроенергію та на механічну обробку переплавленої деталі. Тим більш, що під час переплавлення вигорають легуючі елементи алюмінієвого сплаву, у результаті чого відбувається порушення хімічного складу. Тому спосіб переплавлення зараз не можна вважати прогресивним.

Нарощування зношених поверхонь втулок при відновленні можна виконати декількома способами: шляхом нанесення гальванічних покриттів, покриттям зношених поверхонь полімерами, мідненням, а також методами термодифузійної металізації. Усі ці способи мають гарні результати, але вимагають застосування доволі складного технологічного обладнання та є енергомісткими.

Метод додаткових ремонтних деталей у наш час для відновлення роботоздатності агрегатів гідравлічної системи сільськогосподарської техніки практично не використовується.

Метод пластичного деформування ґрунтується на їх здатності деталей змінювати форму і розміри за рахунок перерозподілу металу деталі при прикладенні до неї зусилля. Цей метод можливо застосовувати як з нагріванням деталі, так і без нагрівання [9, 10, 13].

Суть способу осаджування полягає у тому, що компенсація зношеного шару матеріалу забезпечується шляхом зменшення висоти деталі (втулки). А висота втулка відновлюється або постановкою алюмінієвої шайби, або зменшенням висоти колодязів корпусу насоса.

Осаджування втулок може здійснюватися на гідравлічних пресах (наприклад, П474Б) при тиску $P=430...450$ МПа і з витримкою втулки під тиском протягом 2...3 секунд. Перед осадженням втулки необхідно нагрівати до температури $T=450...500^{\circ}\text{C}$, тому, що при холодній деформації сплав АМО-7-3 може розтріскуватися [4, 6].

Застосування пластичного деформування має переваги: порівняна простота виконання і незначні затрати допоміжного металу. Недоліки способу полягають в тому,

що є потреба у додатковій алюмінієвій шайбі, а також має місце погіршення механічних властивостей матеріалу деталей, що були відновлені.

Форма і розміри втулок шестеренних насосів, пластичні властивості матеріалу втулок, дозволяють використовувати окремі неробочі поверхні, або спеціально передбачені для запасу металу при відновленні їх методом пластичного деформування. Об'єм металу деталі повинен залишатися постійним.

Були проведені дослідження 10 пар втулок по зносу зовнішньої та торцевої поверхонь. В результаті цього виявили найбільше значення зносу спряження торцевих поверхонь втулки та шестерні. На рисунку 1 приведена діаграма результатів мікрометражу 20 шт. втулок насосів по зовнішньому діаметру. А рисунок 3 - діаграма зносу поверхні торця зношених втулок.

Найбільш інтенсивно зношування відбувається у спряженні «торець шестерні - торець втулки». Було досліджено понад 20 пар втулок. Зроблено мікрометраж зовнішньої, внутрішньої та торцевої поверхонь (рис. 1). В результаті отримано значення зносу поверхонь втулки, які приводимо у вигляді діаграм на рисунку 2.

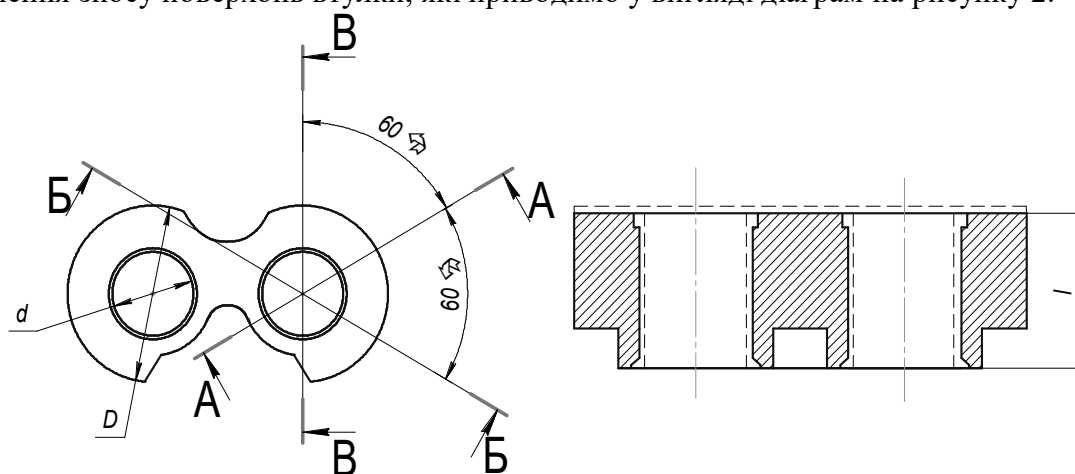


Рисунок 1 - Схема мікрометражу зношених втулок

Джерело: розроблено на підставі [1, 4]

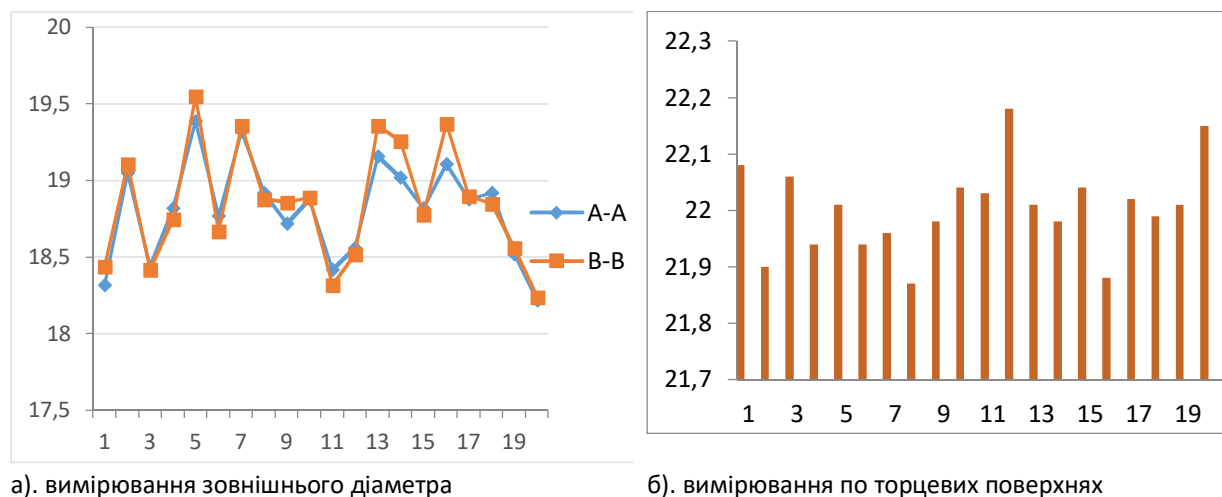


Рисунок 2 – Результати вимірювання зношених втулок насоса

Джерело: розроблено авторами

З графіків видно, що знос втулок по зовнішньому діаметру знаходиться в межах від 0,08 до 0,16 мм. Результати вимірювань свідчать, що спостерігається конусність по зовнішньому діаметру втулок в межах - 0,02...0,03мм.

Визначення об'єму втулок шестеренного насосу. Загальний об'єм втулки розраховуємо як сумарний об'єм її частин [16]. Для розрахунку об'єму втулка була розбита на частини, що дало змогу об'єднати наші розрахунки. В процесі розрахунків використовувались формули об'єму простих фігур.

Втулка має дві однаково симетричні частини, тому для полегшення розрахунків вона була умовно розділена на дві рівні частини.

$$S_{1-9} = S_1 - S_2 - S_3 - S_4 + S_5 - S_6 + S_7 - S_8 - S_9 \quad (1)$$

Схеми вимірювання розмірів втулки для визначення об'єму приведені на рисунках 3...4.

Визначаємо площу круга 1:

$$S_1 = \pi \cdot R_1^2, \quad (2)$$

$$S_1 = 3,14 \cdot 19,31^2 = 1169,62 \text{ мм}^2$$

Визначаємо площу круга 2:

$$S_2 = \pi \cdot R_2^2,$$

$$S_2 = 3,14 \cdot 9^2 = 262,31 \text{ мм}^2$$

Визначаємо площу дуги круга 3:

$$S_3 = \frac{1}{2} R_1^2 (\pi \cdot \frac{\alpha_1}{180^\circ} - \sin \alpha_1), \quad (3)$$

$$S_3 = \frac{1}{2} 19,31^2 (3,14 \cdot \frac{61^\circ 54'}{180^\circ} - \sin 61^\circ 54') = 36,99 \text{ мм}^2.$$

Площа різниці секторів 4:

$$S_4 = S_{41} + S_{42}, \quad (4)$$

$$S_{41} = \frac{1}{2} R_3^2 (\pi \frac{\alpha_3}{180^\circ} - \sin \alpha_3),$$

$$S_{41} = \frac{1}{2} 9,25^2 (\pi \frac{54^\circ 42'}{180^\circ} - \sin 54^\circ 42') = 5,91 \text{ мм}^2$$

$$S_{42} = \frac{1}{2} R_1^2 (\pi \frac{\alpha_2}{180^\circ} - \sin \alpha_2),$$

$$S_{42} = \frac{1}{2} 19,35^2 (3,14 \frac{26^\circ 38'}{180^\circ} - \sin 26^\circ 38') = 4,17 \text{ мм}^2.$$

$$S_4 = 5,91 + 4,17 = 10,08 \text{ мм}^2$$

Площа трикутника 5:

$$S_5 = \frac{AB \cdot AC}{2},$$

$$S_5 = \frac{2 \cdot 1,47}{2} = 1,47 \text{ мм}^2.$$

Площа дуги круга 6:

$$S_6 = \frac{S_1 - \pi R_4^2}{360^\circ} \cdot \alpha_4, \quad (5)$$

$$S_6 = \frac{S_1 - 3,14 \cdot 14,05^2}{360^\circ} \cdot 67^\circ 39' = \frac{(1169,62 - 44,147) 67,65}{360} = 111,49 \text{ мм}^2.$$

Площа трикутника 7:

$$S_7 = \frac{DG \cdot DF}{2},$$

$$S_7 = \frac{5,3 \cdot 4,41}{2} = 11,69 \text{ мм}^2$$

Визначаємо площу трапеції 8:

$$S_8 = \frac{KL + MN}{2} \cdot KM, \quad (6)$$

$$S_8 = \frac{4,56 + 5,3}{2} \cdot 1,07 = 5,28 \text{ мм}^2.$$

Площа сектора 9:

$$S_9 = \frac{\pi R_9^2}{360^\circ} \cdot \alpha_9,$$

$$S_9 = \frac{3,14 \cdot 4,56^2}{360^\circ} \cdot 62^\circ 06' = 11,01 \text{ мм}^2.$$

$$S_{1-9} = 758,46 \text{ мм}^2.$$

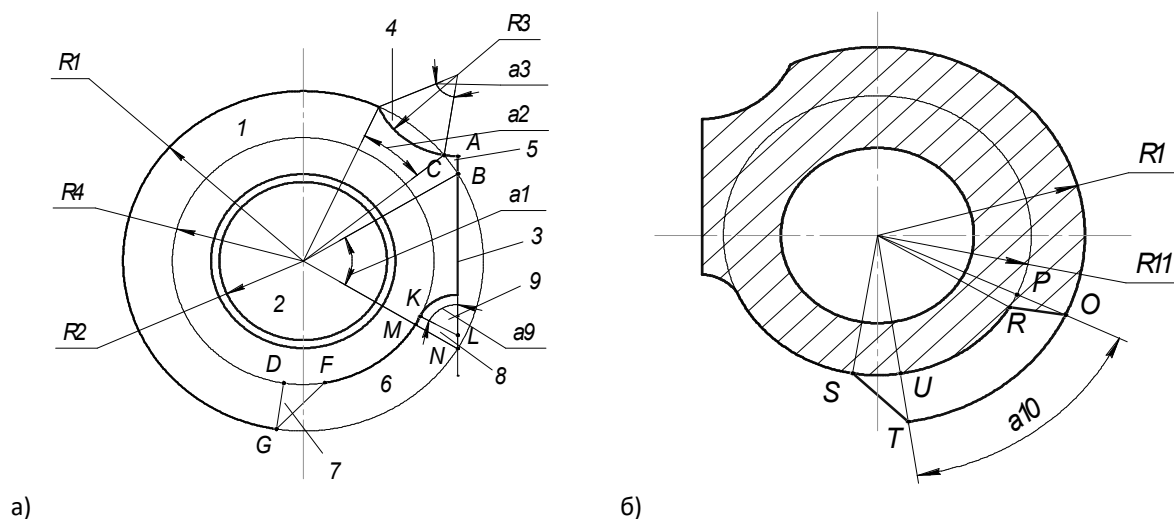


Рисунок 3 - Схема вимірювання розмірів втулки: а). основний вигляд; б) – вигляд А
Джерело: розроблено авторами

Визначаємо площу дуги круга 10:

$$S_{10} = \frac{\pi(R_1^2 - R_{10}^2)}{360^\circ} \cdot \alpha_{10} - S_{10-1} + S_{10-2}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
S_{10-1} &= \frac{OP \cdot PR}{2}, \\
S_{10-1} &= \frac{5 \cdot 1,07}{2} = 2,68 \text{ мм}^2. \\
S_{10-2} &= \frac{TU \cdot US}{2}, \\
S_{10-2} &= \frac{5 \cdot 4,45}{2} = 11,13 \text{ мм}^2. \\
S_{10} &= \frac{3,14(19,35^2 - 14,35^2)}{360^\circ} \cdot 54^\circ 40' - 2,68 + 11,13 = 66,55 \text{ мм}^2 \\
S_{11-18} &= S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} + S_{16} + S_{17} + S_{18}, \tag{8}
\end{aligned}$$

Визначаємо площу дуги кола 11:

$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{R_{11}^2}{2} (\pi \frac{\alpha_{11}}{180^\circ} - \sin \alpha_{11}), \\
S_{11} &= \frac{2,97^2}{2} (3,14 \frac{138^\circ 20'}{180^\circ} - \sin 138^\circ 20') = 7,71 \text{ мм}^2.
\end{aligned}$$

Площа дуги сектора 12:

$$\begin{aligned}
S_{12} &= \frac{\pi(R_{12}^2 - R_5^2)}{360^\circ} \cdot \alpha_{12}, \\
S_{12} &= \frac{3,14(14,35^2 - 12,3^2)}{360^\circ} \cdot 222^\circ 24' = 105,98 \text{ мм}^2.
\end{aligned}$$

Площа дуги сектора 13:

$$\begin{aligned}
S_{13} &= \frac{\pi(R_1^2 - R_{12}^2)}{360^\circ} \cdot \alpha_{13}, \\
S_{13} &= \frac{3,14(19,35^2 - 14,35^2)}{360^\circ} \cdot 147^\circ 28' = 216,74 \text{ мм}^2.
\end{aligned}$$

Площа трикутника 14:

$$\begin{aligned}
S_{14} &= \frac{VX \cdot XW}{2}, \\
S_{14} &= \frac{5 \cdot 4,45}{2} = 11,13 \text{ мм}^2.
\end{aligned}$$

Площа трикутника 15:

$$\begin{aligned}
S_{15} &= \frac{ZY \cdot YA1}{2}, \\
S_{15} &= \frac{2,05 \cdot 5,05}{2} = 5,18 \text{ мм}^2.
\end{aligned}$$

Площу трапеції 16 визначаємо за формулою:

$$\begin{aligned}
S_{16} &= \frac{B1C1 + E1D1}{2} \cdot C1D1, \tag{9} \\
S_{16} &= \frac{4,38 + 3,72}{2} \cdot 5,39 = 21,83 \text{ мм}^2.
\end{aligned}$$

Площа дуги круга 17:

$$S_{17} = \frac{\pi R_{17}^2}{4},$$

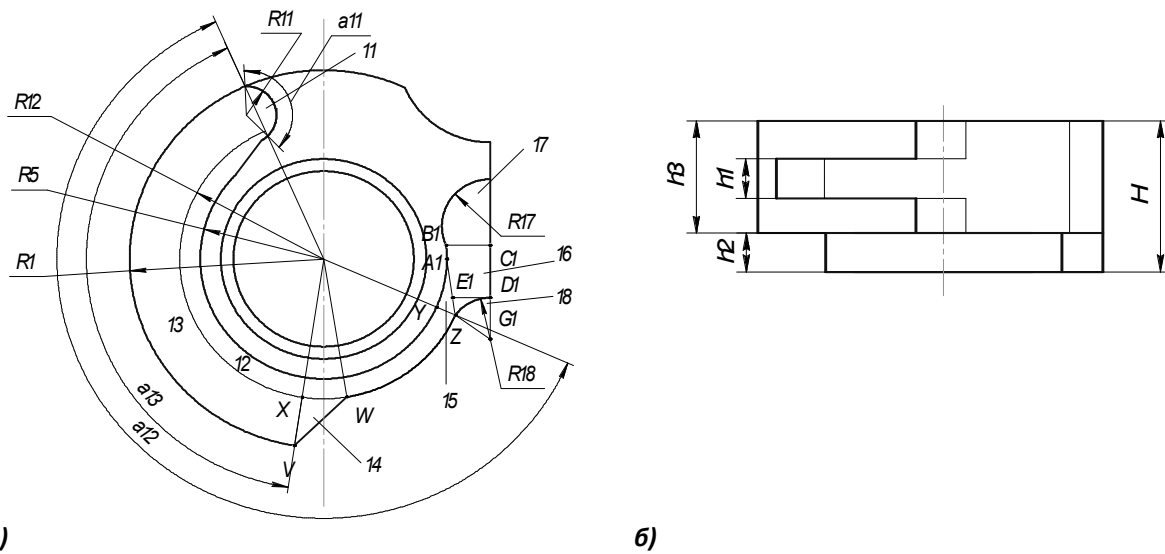
$$S_{17} = \frac{3,14 \cdot 4,38^2}{4} = 15,06 \text{ мм}^2.$$

Визначаємо площу різниці трапеції та дуги круга 18:

$$S_{18} = \frac{E1Z + D1G1}{2} \cdot E1D1 - \frac{\pi R_{18}^2}{360^\circ} \cdot \alpha_{18}, \quad (10)$$

$$S_{18} = \frac{4,25 + 1,78}{2} \cdot 3,72 - \frac{3,14 \cdot 4,25^2}{360^\circ} \cdot 54^\circ 29' = 2,63 \text{ мм}^2.$$

$$S_{11-18} = 2201,608 \text{ мм}^2.$$



а)

б)

Рисунок 4 - Схема вимірювання розмірів втулки: а). вигляд Б; б) – висоти

Джерело: розроблено авторами

Об'єм частини втулки з головного вигляду, не враховуючи інших видів.

$$V_{1-9} = S_{1-9} \cdot H, \quad (11)$$

$$V_{1-9} = 758,46 \cdot 22,17 = 16799,96 \text{ мм}^3.$$

Об'єм частини втулки з вигляду А.

$$V_{10} = S_{10} \cdot h1,$$

$$V_{10} = 66,55 \cdot 5,8 = 385,99 \text{ мм}^3.$$

Об'єм частини втулки з вигляду Б.

$$V_{11-18} = S_{11-18} \cdot h2.$$

$$V_{11-18} = 2201,608 \cdot 1,0 = 2201,608 \text{ мм}^3$$

Загальний об'єм втулки становить:

$$V_{заг} = 2 \cdot (V_{1-9} - V_{10} - V_{11-18}), \quad (12)$$

$$V_{заг} = 16799,96 - 385,99 - 2201,61 = 14212,36 \text{ мм}^3.$$

Завдяки проведених розрахунків встановлено залежність зміни об'єму втулки від зміни її розмірів – висоти і внутрішнього радіусу. За результатами розрахунків побудована діаграма зміни об'єму втулки у залежності від значень висоти H і внутрішнього радіусу $R2$ (рис. 5).

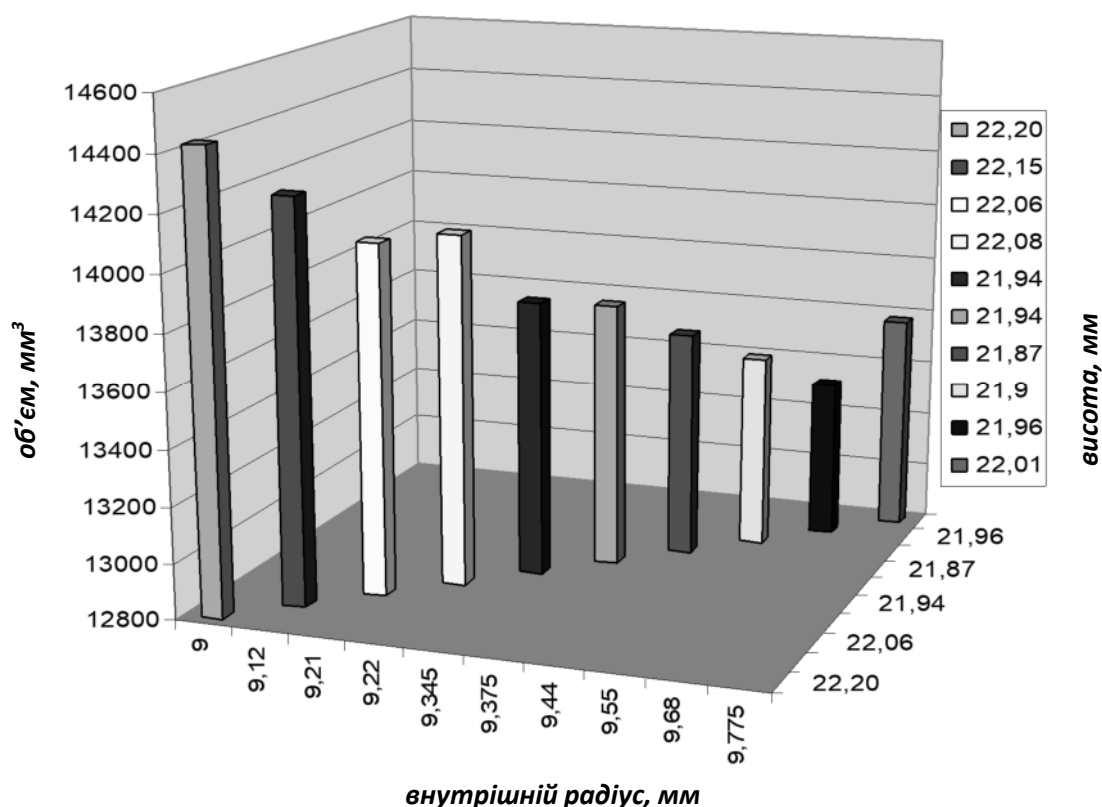


Рисунок 5 - Діаграма зміни об'єму втулок в залежності від величини внутрішнього радіусу (R2 - середній пояс) та висоти втулки Н

Джерело: розроблено авторами

З діаграми бачимо, що об'єм зменшується із збільшенням внутрішнього радіусу середнього пояса і висоти втулки, що свідчить про те, що в даному пояску знос втулки носить типовий характер для даного спряження.

Отже, чим більше знос має втулка, тим більший об'єм металу нам потрібно змістити в процесі відновлення. Залежність об'єму від геометричних параметрів дає змогу прогнозувати об'єм металу, який повинен бути зміщений при пластичній деформації.

Висновки. Дослідження по застосуванню технологій пластичного деформування у процесах ремонту зношених втулок шестеренних насосів гідросистем автотракторної техніки є актуальними.

Виконано техніко-аналітичний огляд конструкції та функціональних характеристик шестеренних насосів як елементів гідравлічних систем.

Проаналізовано закономірності зношування втулок на основі мікрометричних досліджень. Встановлені типові дефекти та критичні зони втрат металу. Зокрема, вимірюваннями зовнішньої, внутрішньої та торцевої поверхонь зношених втулок виявлено, що знос втулок по зовнішньому діаметру знаходиться в межах від 0,08 до 0,16 мм, а також, конусність по зовнішньому діаметру втулок в межах - 0,02...0,03мм. Результати свідчать, що зношені втулки можна відновлювати.

У результаті аналізу способів відновлення деталей типу втулок визначено, що одним із перспективних методів відновлення зношених втулок є пластичне деформування.

За розробленою методикою геометричного моделювання втулок здійснено розрахунок їх об'ємних параметрів на основі складових простих геометричних фігур.

Досліджено залежність об'єму втулок від величини зносів втулок по висоті та по внутрішньому діаметру. За результатами підрахунків побудована діаграма зміни об'єму

втулок в залежності від величини внутрішнього радіуса та висоти втулки. Встановлена залежність зміни об'єму втулки від зміни її розмірів. Побудована аналітична модель залежності об'єму втулки від основних геометричних параметрів (висоти та внутрішнього радіуса). Використання якої дає змогу прогнозувати об'єм металу, який повинен бути зміщений у процесі пластичної деформації при осадженні втулки.

Обґрунтована доцільність використання способу осаджування як ефективного інженерного рішення при відновленні конкретних деталей, а саме, втулок шестеренних насосів гідравлічних систем автотракторної техніки.

Список літератури

1. Шестерний насос – призначення і особливості: веб-сайт. URL <https://kammash.com/ua/shesternij-nasos-priznachennya-i-osoblivosti/> (дата звернення: 07.05. 2025).
2. Устюнов П.Д., Домуші Д. П. Діагностування гідравлічної системи тракторів. *Аграрний вісник причорномор'я*. 2016. Вип. 80. С.76-81
3. Павлюк-Мороз, В. А., Осін Р. А., Чабанний В. Я. Стенд для перевірки ресурсу шестеренних насосів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кіровоград: КНТУ, 2008. Вип. 38. С. 97-99.
4. Технологічні особливості ремонту гідросистем тракторів. Щомісячний журнал AGROEXPERT. URL: <https://agroexpert.ua/tehnolohichni-osoblyvosti-remontu-hidrosystem-traktoriv/> (дата звернення: 10.05. 2025).
5. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія / Аулін В. В. та ін. ; за ред. проф. В. В. Ауліна. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2016. 303 с.
6. Сивак Р. І., Огородніков В. А., Архіпова Т. Ф. Немонотонна пластична деформація в процесах обробки металів тиском : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2022. 202 с.
7. Хітров І.О., Кононогов Ю.А. Відновлення деталей пластичним деформуванням та способи для його здійснення. *Вчені записки ТНУ ім/ В.І. Вернадського. Технічні науки*. Т. 35 (74) № 1 2024. С. 191-196.
8. Афтаназів І., Шевчук Л., Строган О., Стругинська Л., Строган І. Підвищення довговічності циліндричних деталей колісних візків залізничних вагонів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. Т. 5. №1. С. 136-145
9. Dudnikov A.A., Ivankova O.V., Gorbenko O.V., Kelemesh A.O. Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2021. № 2/1 (110). P. 104-108. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228606.
10. Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування : монографія: *Теорія і практика обробки матеріалів тиском*. Запоріжжя, вид. АТ «Мотор Січ». 2016. С. 339– 363.
11. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 180 с.
12. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6/7 (90). P. 34-41. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.115040
13. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Штуць А. А. Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при висаджуванні ресурсоощадним методом штампування обкочуванням. *Всеукраїнський науково-технічний журнал Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 1 (120). С. 76-85. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-9
14. Вахрушева В. С., Малиш О. Д., Грузін Н. В. Визначення залишкових напружень в трубах. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2023. № 1 (100). С. 8-13. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.280323.8.939
15. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Колісник М. А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванню методом штампування обкочуванням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. №1 (104). С. 81–91.
16. Мельнікова О.Г. Підсумовуюча формула Ейлера та її застосування. *Фізико-математична освіта: Науковий журнал*. 2017. Вип. 4 (14). С.225-228.

References

1. Gear pump – purpose and features. <https://kammash.com/ua/shesternij-nasos-priznachennya-i-osoblivosti> [in Ukrainian].
2. Ustyanov P.D., & Domuschi D. P. (2016). Diagnostics of the hydraulic system of tractors. *Agrarian Bulletin of the Black Sea Region*, 80,76-81 [in Ukrainian].
3. Pavlyuk-Moroz, V. A., Osin R. A., & Chabannyi V. Ya. (2008) Stand for checking the resource of gear pumps. *Design, production and operation of agricultural machines: all-state interdepartmental scientific and technical collection*, 38, 97-99 [in Ukrainian].
4. Technological features of tractor hydraulic system repair. Monthly magazine AGROEXPERT. <https://agroexpert.ua/tehnolohichni-osoblyvosti-remontu-hidrosystem-traktoriv> . [in Ukrainian].

5. Aulin V. V. (2016). *Tribophysical foundations of increasing the reliability of mobile agricultural and motor vehicle equipment using tribotechnical restoration technologies*: monograph / edited by Prof. Aulin V. V. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
6. Sivak R. I., Ogorodnikov V. A., & Arkhipova T. F. (2022). *Nonmonotonic plastic deformation in metal pressure processing processes*. Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].
7. Khitrov I.O., & Kononogov Y.A. (2024). Restoration of parts by plastic deformation and methods for its implementation. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky*, 35 (74), 191-196 [in Ukrainian].
8. Aftanaziv I., Shevchuk L., Strohan O., Strutynska L., & Strohan I. (2021) Increasing the durability of cylindrical parts of wheel bogies of railway cars. *Mechanics and Advanced Technologies*. 5, 136-145 [in Ukrainian].
9. Dudnikov A.A., Ivankova O.V., Gorbenko O.V., & Kelemesh A.O. (2021) Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2/1, 104-108. [in English]. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228606.
10. Matviychuk V. A., & Mikhalevych V. M. (2016). *Development of local deformation processes: monograph: Theory and practice of pressure processing of materials*. Zaporizhzhia, "Motor Sich", [in Ukrainian].
11. Mykhalevych V. M., & Dobranyuk Y. V. (2013) *Modeling of stress-strain and limit states of the surface of cylindrical specimens under end compression: monograph*. Vinnytsia: VNTU, [in Ukrainian].
12. Sivak R. (2017). Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (2013), 34-41 [in English]. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.115040.
13. Matviychuk V. A., Mykhalevych V. M., & Shtuts A. A. (2023). Analysis of the stress-strain state of the material of the blanks during planting by the resource-saving method of stamping by rolling. *All-Ukrainian scientific and technical journal Technology, Energy, Transport of the Agricultural Complex*, 1 (120), 76-85 [in Ukrainian]. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-9.
14. Vakhrusheva V. S., Malysh O. D., & Gruzin N. V. (2023). Determination of residual stresses in pipes. *Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 1 (100), 8-13 [in Ukrainian]. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.280323.8.939.
15. Matviychuk V. A., Mykhalevych V. M., & Kolisnyk M. A. (2022). Assessment of the deformability of the material of the blanks during direct and reverse extrusion by the rolling stamping method. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 1 (104), 81-91. [in Ukrainian].
16. Melnikova O. G. (2017). Summary of Eylers Formula end Its Application // *Physics and Mathematics Education: Scientific Journal*, 4 (14), 225-228 [in Ukrainian].

Olena Ivankova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vitaly Fedin**

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Research on the Restoration of Gear Pump Parts by Plastic Deformation

Restoration of worn parts of agricultural machinery allows to significantly reduce the downtime of machines, as well as to improve the quality of repairs and positively affect the durability of machines. Currently, there is a need for research into the use of technologies based on plastic deformation in the repair of specific parts. Gear pumps are an important component of hydraulic systems of machines. Not only the efficiency of the unit, but also the quality of control and adjustments depends on the operation of the pumps. Currently, the analysis of the possibility of using plastic deformation in the restoration of worn bushings of gear pumps of hydraulic systems of autotractor equipment is relevant. To this end, the dependence of the change in the volume of the bushing on the change in its geometric parameters during restoration by plastic deformation (deposition) was investigated. Currently, the analysis of the possibility of using plastic deformation in the restoration of worn bushings of gear pumps of hydraulic systems of autotractor equipment is relevant. To this end, the dependence of the change in the volume of the bushing on the change in its geometric parameters during restoration by plastic deformation (deposition) was investigated.

The results of a technical and analytical review of the design and functional characteristics of gear pumps as elements of hydraulic systems are presented. The patterns of bushing wear are analyzed based on micrometric studies. A method of geometric modeling of bushings has been developed and their volumetric parameters have been calculated. The dependence of the bushing volume on the amount of bushing wear in height and in the inner diameter has been investigated. The dependence of the change in the bushing volume on the change in its dimensions has been established. An analytical model of the dependence of the bushing volume on the main geometric parameters has been constructed. The feasibility of using the deposition method as an effective engineering solution for the restoration of specific parts, namely, bushings of gear pumps of hydraulic systems of auto-tractor equipment, has been substantiated.

pump, restoration, durability, wear, volume, plastic deformation, deposition

Одержано (Received) 20.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 631.363.2

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.187-194](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.187-194)**Р. В. Кісільов**, доц., канд. техн. наук, **П. Г. Лузан**, доц., канд. техн. наук,**В. В. Амосов**, доц., канд. техн. наук, **М. О. Васильковський***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: ruslan_vik@ukr.net, luzanpg@ukr.net, v_vas_a@ukr.net, golkercozes@gmail.com*

Дослідження впливу конструктивних параметрів змішувача на якість приготування кормової суміші

У статті наведено експериментальні дослідження вдосконаленого лопатевого змішувача для приготування повноцінних кормових сумішей для великої рогатої худоби. В результаті цих досліджень визначено діапазон раціональних значень, за якого досягається підвищення ефективності роботи досліджуваного лопатевого змішувача та оптимізуються енергетичні витрати на привід мішалки. Побудовано графічні залежності, що ілюструють вплив геометричних і кінематичних параметрів на ступінь однорідності змішування кормів і рівень енергоспоживання приводу.

змішувач кормів, кормова суміш, добовий раціон, зоотехнічні вимоги, тваринництво, однорідність кормосуміші

Постановка проблеми. Молочне та м'ясне скотарство в Україні є однією з ключових і найважливіших галузей тваринництва, яка забезпечує понад 95% виробництва коров'ячого молока та близько 50-60% яловичини. З огляду на постійне зростання попиту на якісне молоко, яловичину та продукти їх переробки на світовому ринку, дана галузь має вагоме економічне значення для подальшого розвитку тваринництва в нашій країні. У загальному процесі виробництва продукції тваринництва ключову роль відіграють корми. Проте їхня якість залишається досить низькою, а обсяги виробництва - недостатні. При цьому частка кормів у собівартості молока та яловичини перевищує 50% усіх витрат.

У більшості господарств України витрати кормів на виробництво 1 ц молока становлять 50-65%. У провідних господарствах цей показник на 20-35% нижчий, а собівартість 1 ц кормових одиниць - менша на 18-20%.

Зниження витрат на виробництво кормів досягається шляхом підвищення врожайності та якості кормових культур, їх раціонального використання, покращення умов зберігання, належної підготовки до згодовування та мінімізації втрат. Водночас, за нинішнього рівня виробництва молочної продукції витрати кормів перевищують встановлені нормативи на 17-28%.

Останніми роками як у країнах Європи, так і в Україні запроваджено більш жорсткі вимоги до якості виробництва молока, яловичини та продуктів їх переробки. Це зумовлює необхідність суттєвого прискорення впровадження інтенсивних технологій підготовки кормів до згодовування, а також приготування збалансованих і повноцінних кормових сумішей.

Такі суміші мають містити збагачувальні компоненти, вітаміни, ферменти, біостимулятори, транквілізатори та лікувально-профілактичні засоби. Для цього необхідне застосування сучасної техніки нового покоління, комплексної механізації й автоматизації процесів приготування кормів [1].

Узагальнений аналіз традиційних машин і технічних засобів для приготування збалансованих кормових сумішей для великої рогатої худоби показав, що наявні змішувачі не повністю відповідають вимогам щодо забезпечення належної якості вологих кормосумішей та мають низку недоліків. Зокрема, конструкції мобільних змішувачів

перевищують нормативні показники питомої матеріалоемності у 1,5...2 рази, а витрати енергії на привід робочих органів - у 3...4 рази. Подібні виявлені недоліки істотно обмежують можливості застосування таких змішувачів на фермах і комплексах ВРХ, а їх використання у потокових лініях є малоефективним. Саме це зумовлює актуальність питання підвищення ефективності роботи та технічного рівня змішувачів для приготування вологих кормосумішей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В теорії змішування основне місце займають питання, що направлені на дослідження самого механізму сумішоутворення в залежності від конструкції робочих органів. Більш ґрунтовно до теоретичного та експериментального обґрунтування процесів інтенсифікації гравітаційних барабанних змішувачів безперервної дії зі згладжувальним ефектом для приготування повнораціональних вологих кормових сумішей на фермах ВРХ підійшов Фурса І.І. [2]. У циклі своїх досліджень він уперше всебічно розглянув процес змішування у всій його складності та взаємозв'язках, врахувавши закономірності впливу псевдорозрихлення активним прутковим бітером і конвеєрного змішувача безперервної дії зі згладжувальною здатністю. Крім того, досліджено вплив нерівномірності подачі дозуючих технічних засобів на ефективність приготування вологих кормових сумішей у змішувачах безперервної дії. Дослідженнями різних циркуляційних змішувачів шнекового типу займалися Вагін Б.І. та Ревенко І.І. [3]. Названі автори обґрунтували ефективність застосування багатошнекових змішувачів, як стаціонарних, так і пересувних, для приготування сипких і вологих кормових сумішей. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень були встановлені оптимальні конструктивні параметри та режими роботи горизонтальних і вертикальних шнекових змішувачів. Також в їхніх працях було розглянуто конструкції двох-, трьох-, чотирьох- та шестишнекових змішувачів. За результатами аналізу встановлено, що найбільш ефективними за продуктивністю та якістю змішування вологих кормових сумішей є змішувачі з горизонтальними чотирьоххвальними шнеками, оснащеними ножами. Водночас доведено, що трьоххвальні змішувачі відрізняються відносно низькою енергетичною матеріалоемністю. Дослідження Кукти Г.М. [4, 5] показують, що найбільш ефективні у порівнянні зі шнековими змішувачами є лопатеві, бітерні та комбіновані стрічково-лопатеві. При цьому, вони відмічають складність проходження технологічного процесу, який має свої істотні відмінності. Тому в теоретичних дослідженнях особливо важливого значення набуває фізико-механічна сторона самого процесу змішування кормів та математичне моделювання властивостей складних сипучих матеріалів. Оскільки складові компоненти суміші відрізняються фізико-механічними властивостями та характеризуються підвищеною вологістю, виникає потреба у забезпеченні відповідного впливу робочих органів. Це вимагає обґрунтованого вибору форми атакуючої поверхні лопатей, їхніх розмірів, кута встановлення, кроку та режимів роботи, що безпосередньо впливають на ефективність процесу сумішоутворення й продуктивність змішувача. Дослідження також засвідчили, що однорідність суміші досягається швидше, якщо на частки компонентів діють більші імпульси сил лопатей в осьовому та поперечному перерізах змішувача, а також створюється ефект псевдорозрихлення маси [6, 7].

Постановка завдання. Метою цієї статті є суттєве підвищення якості та вдосконалення процесу змішування різних компонентів корму шляхом застосування нової конструкції плоско-лопатєвого змішувача з послідовним обґрунтуванням конструктивно-кінематичних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Висока ефективність процесу повного механічного змішування заздалегідь підготовлених компонентів настає завдяки

невпорядкованому перерозподілу часток під дією активних зовнішніх сил робочих елементів змішувача, що забезпечує відповідність зоотехнічним вимогам щодо характерного вмісту вибраних компонентів у всій фракції суміші згідно з розробленим рецептом добового раціону для великої рогатої худоби (ВРХ) (рис. 1).

Як правило, у змішувачах що мають досить досконалі конструкції, масообмін між потоками встановлених компонентів суміші відбувається за рахунок стійкого вирівнювання їх концентрації в загальному об'ємі завдяки збільшенню кількості зіткнень, використанню складніших траєкторій руху та більшої кількості перетинів порівняно з традиційними змішувачами (рис. 2) [8].

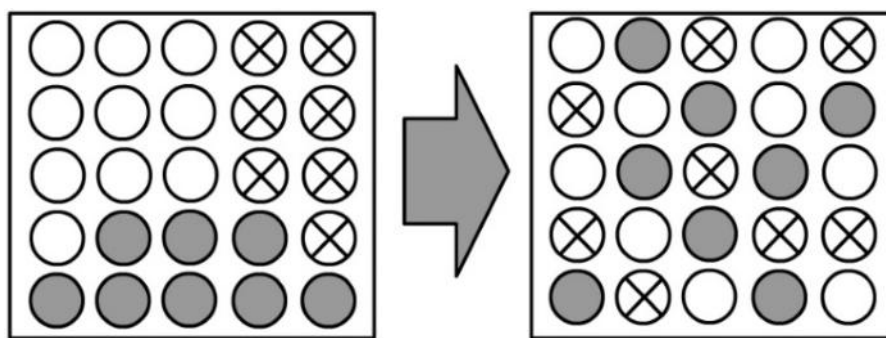
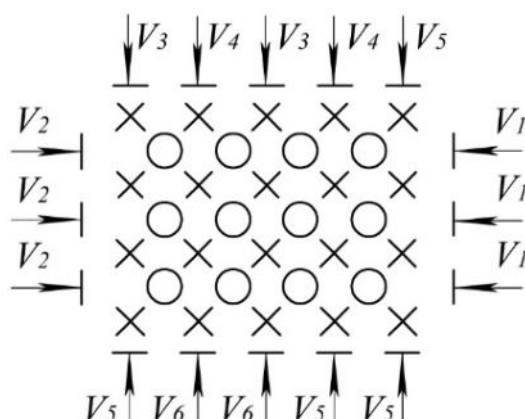


Рисунок 1 – Характерний стан повного змішування та утворення повнораціонної суміші шляхом ефективного перерозподілу дискретних часток враховуючи їх співвідношення

Джерело: розроблено авторами



$V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ – сформований напрямок та швидкість активного руху (осьової, кругової і відцентрової) підготовлених компонентів суміші під дією плоских лопатей і пальців

Рисунок 2 – Вигляд графічної схеми запропонованого процесу сумішоутворення.

Джерело: розроблено авторами

Найбільший вплив на якість приготування кормових сумішей та рівень енергетичних витрат справляє безпосередньо процес змішування, що протікає у бункері змішувача. На його перебіг істотно впливають такі чинники, як співвідношення питомої подачі й фізико-механічні властивості компонентів, стан сировини, нерівномірність дозування підготовлених компонентів, геометричні та кінематичні параметри мішалки, а також тривалість змішування.

За результатами теоретичного аналізу та проведених експериментальних досліджень визначено найбільш значущі та впливові фактори, що активно діють на

процес змішування компонентів корму, а саме: частота обертання валу мішалки n , потім ширина b , висота h та кут нахилу лопаті відносно осі валу α , крок розміщення лопатей S , а також тривалість процесу змішування t .

З метою визначення впливу основних факторів на цільову функцію, обґрунтування раціональних параметрів мішалки та отримання якісної оцінки процесу сумішоутворення запропоновано конструкцію плоско-лопатевого змішувача (рис. 3).

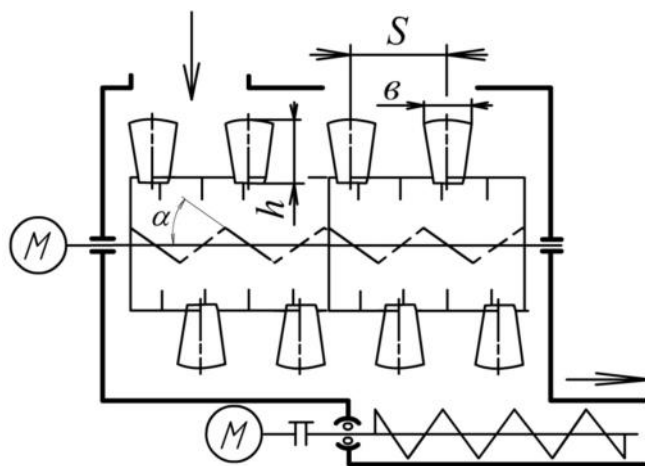


Рисунок 3 – Технологічна схема плоско-лопатевого змішувача

Джерело: розроблено авторами

Процес приготування збалансованих повнораціонних сумішей відбувається наступним чином. Під час роботи змішувача з удосконаленою мішалкою віддозовані компоненти пошарово подаються збірним транспортером в бункер, де потрапляють під дію плоских лопатей та радіальних пальців. Починається конвективне змішування, а саме поступове вирівнювання потоку та перерозподіл груп компонентів уздовж всього об'єму бункера. Лопаті, які жорстко закріплені до конструкції верхнього ряду з правим кутом нахилу відокремлюють частину компонентів корму по всій ширині лопаті і активно переміщують матеріал праворуч в радіальному, а також круговому і осьовому напрямках, а потім другий ряд вже з лівим кутом нахилу - ліворуч і далі цей процес повторюється. При цьому частки кожного компонента потрапляють в зону активної взаємодії складних рухів, перетинів та постійних зіткнень і періодично переміщуються з одного сформованого потоку до іншого, що прискорює їх перерозподіл у мікрооб'ємах, тобто триває процес дифузійного змішування.

Оцінку ефективної роботи запропонованого змішувача проводили перевіркою якості виконання процесу сумішоутворення та характерними витратами потужності на привід мішалки N . Ступінь змішування компонентів контролювали аналізом відібраних проб [9, 10].

Якість кормів визначали використовуючи коефіцієнт неоднорідності V_n за допомогою стандартної методики [11, 12, 13], тобто шляхом розподілу контрольного компонента по завершенню процесу в 10 пробах, відібраних пробовідбірником, за наступним виразом:

$$V_n = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де S - значення середньоквадратичного відхилення контрольного компонента за наслідками досвіду;

$\bar{x}$ - середньоарифметичний показник вмісту контрольного компонента у всіх пробах.

Експериментальні дослідження проводилися за одночасної зміни чотирьох найбільш впливових чинників $V_n = f(\beta, \alpha, n, t)$ у відповідних межах параметричних обмежень.

За рахунок використання прикладної програми STATISTICA 6.0 ми планували експериментальні дослідження та отримали графічні залежності впливу вище встановлених чинників на якісні і енергетичні показники процесу приготування збалансованих сумішей (рис. 4-7).

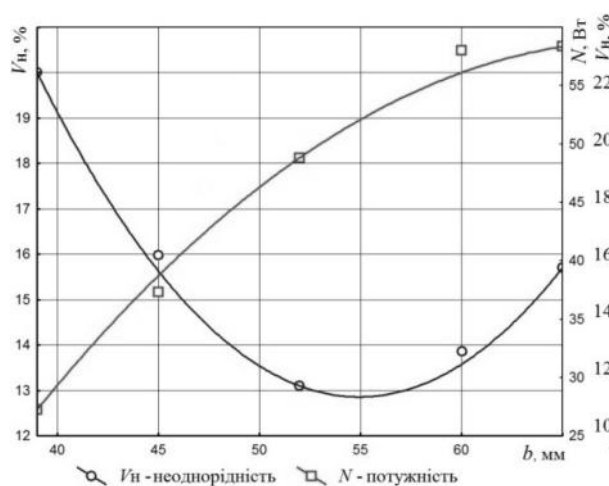


Рисунок 4 – Вплив ширини лопаті на ефект змішування компонентів і потужність приводу

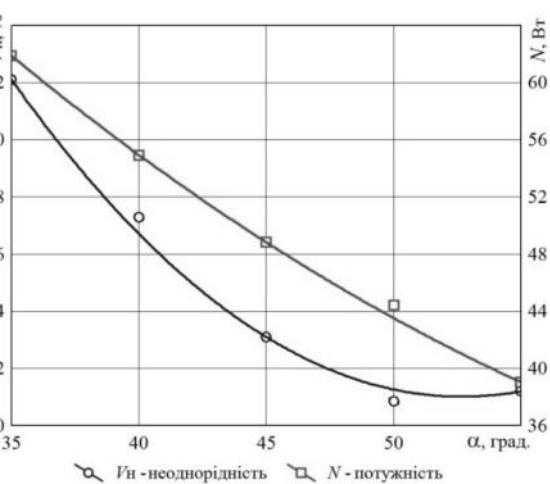


Рисунок 5 – Залежність кута нахилу лопаті на ефект сумішоутворення та потужність приводу

Джерело: розроблено авторами

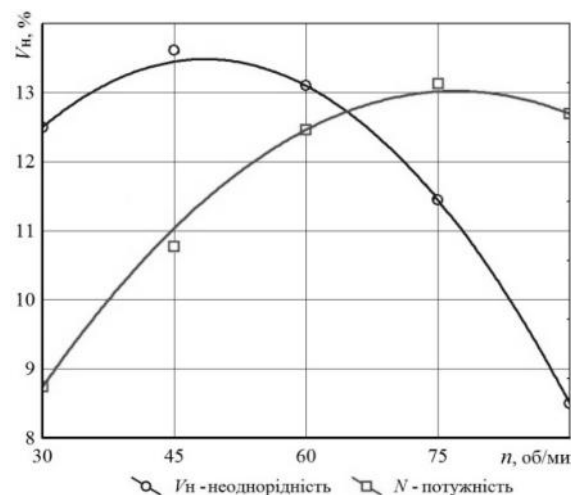


Рисунок 6 – Вплив частоти обертання мішалки на ефект змішування і потужність приводу

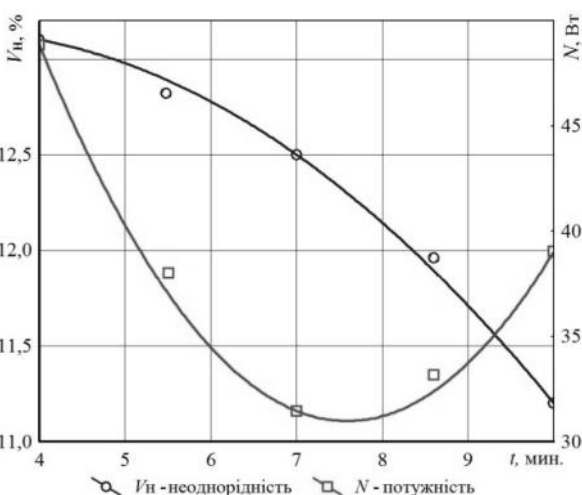


Рисунок 7 - Вплив тривалості змішування на ефект сумішоутворення

Джерело: розроблено авторами

Крім того, було побудовано графіки стабільності змішування з метою аналізу взаємного впливу тривалості процесу на ступінь однорідності кормової суміші (рис. 8). Отримані залежності дозволили додатково підтвердити висновки, зроблені за результатами побудованих графіків щодо раціональних меж коливання кута нахилу лопаті $\alpha = 45 \dots 50^\circ$ у взаємодії з кожним із досліджуваних факторів.

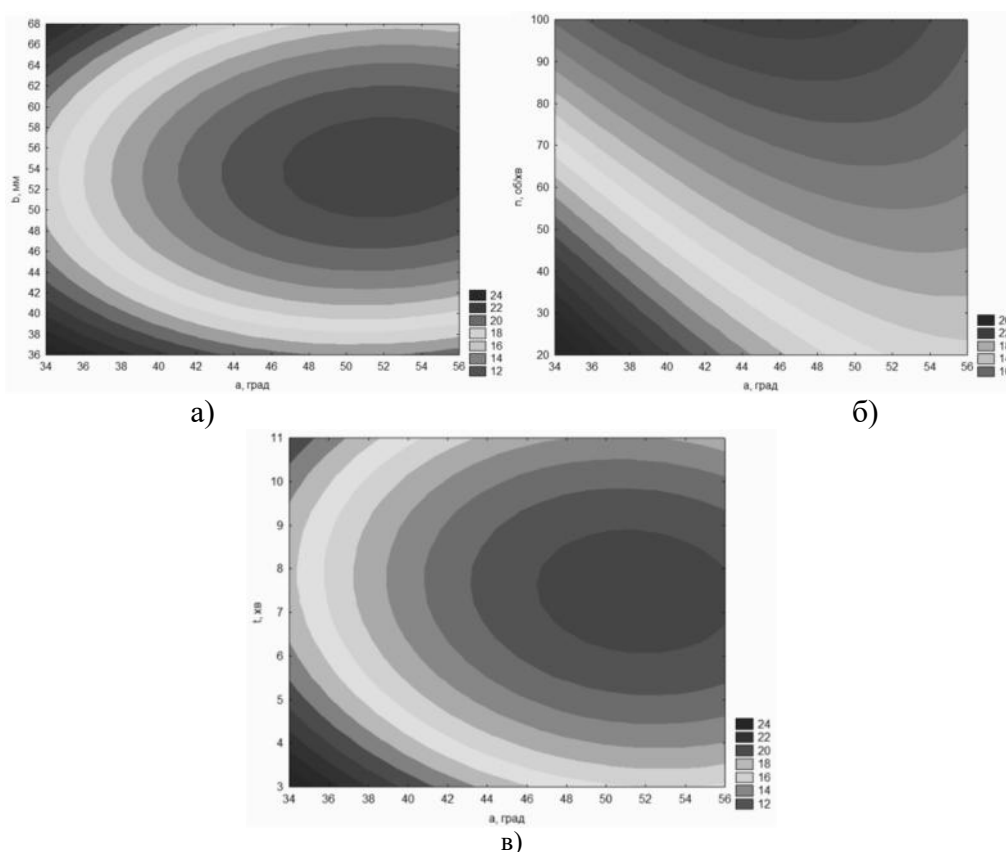


Рисунок 8. Графіки ліній стабільності взаємного впливу кута нахилу лопатей разом з іншими факторами на ефект змішування кормів

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Проведені експериментальні дослідження показали, що обґрунтована технологічна схема комбінованого плоско-лопатевого змішувача кормів дозволяє реалізувати процес приготування збалансованих повнораціонних кормосумішей для ВРХ до регламентованого ступеню.

Завдяки дослідженням обґрунтовані наступні раціональні параметри: ширина лопаті - 45 мм, кут нахилу до вісі валу - 50^0 , частота обертання валу мішалки - 90 об/хв. та тривалість процесу сумішоутворення 7 хв. Враховуючи значення параметрів конструкція розробленого змішувача забезпечує однорідність суміші на рівні 92% (згідно зоотехнічних вимог показник однорідності для ВРХ складає 86%). [14]. Тому подальше використання запропонованої конструкції лопатевого змішувача є доцільним та ефективним.

Список літератури

1. Ібатуллін І. І., Мельник Ю. Ф., Отченашко В. В. *Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин* : навч. посіб. / за ред. акад. НААН України І. І. Ібатулліна. Київ, 2015. 422 с.
2. Ревенко І. І., Хмельовський В. С., Заболотько О. О. *Машини і обладнання для тваринництва* : електрон. підручник. Київ : ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти», 2019.
3. Кісільов Р. В. Теоретичні дослідження процесу змішування кормів стрічково-лопатевим змішувачем. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : зб. наук. праць. Кропивницький : КНТУ, 2011. Вип. 24, ч. 1. С. 167–175.
4. Лазаревич А. П. Однотипові кормосуміші для молочної худоби. *Тваринництво України*. 2007. № 4. С. 33–35.
5. Кісільов Р. В., Матвеев К. Д., Лузан П. Г., Матвеева В. О. Аналіз конструктивно-технологічних і кінематичних параметрів змішування кормів для ВРХ. *Конструювання, виробництво та*

- експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький : КНТУ, 2011. Вип. 41, ч. 2. С. 167–173.
6. Хмельовський В. С. Оцінка рівномірності змішування кормів. *Зб. тез доп. XII Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ : НУБіП України, 2017. С. 77–78.
 7. Ревенко І., Ревенко Ю. Якість приготування та ефективність використання концентрованих та комбінованих кормів. *MOTROL*. Lublin-Rzeszow, 2013. Вип. 3. С. 356–361.
 8. Науменко О. А., Бойко І. Г., Грідасов В. І., Дзюба А. І. *Проектування технологій і технічних засобів для тваринництва* / за ред. О. П. Скорика, В. М. Полупанова. Харків : ХНТУСГ, 2009. 429 с.
 9. Шевченко І. А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва вологих високозасвоєваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 43. С. 179–185.
 10. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Ребенко В. І. *Машини та обладнання для тваринництва*. Київ : Кондор, 2009. 730 с.
 11. Шацький В. В., Мілько Д. А., Болтянський Б. В., Коломієць С. М., Семенцов В. І. Якість змішування компонентів раціону – основа підвищення продуктивності тварин. *Зб. наук. праць Таврійського держ. агротехнол. ун-ту*. Мелітополь, 2013. Вип. 1, т. 3. С. 43–50.
 12. Шацький В. В. Математичне моделювання динамічності щільності та якості кормової суміші для тварин. *Наук. вісник Таврійського держ. агротехнол. ун-ту*. Мелітополь, 2012. Вип. 2, т. 2. С. 3–19.
 13. Шабельник Б. П. *Теорія та розрахунок машин для тваринництва* : монографія. Харків : ХДТУСГ, 2002. 216 с.
 14. Черновол М. І., Свірень М. О., Кісільов Р. В. Приготування кормових сумішей комбінованим змішувачем. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 2. С. 54–59.

References

1. Ibatullin, I. I., Melnyk, Yu. F., & Otchenashko, V. V. (2015). *Praktykum z hodivli silskohospodarskykh tvaryn* [Workshop on feeding farm animals] (I. I. Ibatullin, Ed.). Kyiv. [in Ukrainian].
2. Revenko, I. I., Khmelovskiy, V. S., & Zabolotko, O. O. (2019). *Mashyny i obladnannia dlia tvarynnystva* [Machines and equipment for animal husbandry]. Kyiv: State Scientific and Methodological Center for Higher and Professional Pre-Higher Education. [in Ukrainian].
3. Kisilov, R. V. (2011). Teoretychni doslidzhennia protsesu zmishuvannia kormiv strichkovo-lopatevym zmishuvachem [Theoretical studies of the feed mixing process with a belt-blade mixer]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. prats*, 24(1), 167–175. Kropyvnytskyi: KNTU. [in Ukrainian].
4. Lazarevych, A. P. (2007). Odnotypovi kormosumishi dlia molochnoi khudoby [Uniform feed mixtures for dairy cattle]. *Tvarynnystvo Ukrainy*, 4, 33–35. [in Ukrainian].
5. Kisilov, R. V., Matvieiev, K. D., Luzan, P. H., & Matvieieva, V. O. (2011). Analiz konstruktyvno-tehnologichnykh i kinematychnykh parametriv zmishuvannia kormiv dlia VRKh [Analysis of structural-technological and kinematic parameters of feed mixing for cattle]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 41(2), 167–173. Kropyvnytskyi: KNTU. [in Ukrainian].
6. Khmelovskiy, V. S. (2017). Otsinka rivnomirnosti zmishuvannia kormiv [Assessment of the uniformity of feed mixing]. In *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, Kyiv: NUBiP of Ukraine, 77–78. [in Ukrainian].
7. Revenko, I., & Revenko, Yu. (2013). Yakist pryhotuvannia ta efektyvnist vykorystannia kontsentrovanykh ta kombinovanykh kormiv [Quality of preparation and efficiency of using concentrated and combined feeds]. *MOTROL*, 3, 356–361. Lublin–Rzeszow. [in Ukrainian].
8. Naumenko, O. A., Boiko, I. H., Hrydasov, V. I., & Dziuba, A. I. (2009). *Proiektuvannia tekhnolohii i tekhnichnykh zasobiv dlia tvarynnystva* [Design of technologies and technical means for animal husbandry] (O. P. Skoryk & V. M. Polupanov, Eds.). Kharkiv: KhNTUSG. [in Ukrainian].
9. Shevchenko, I. A., Pavlichenko, V. M., Lykhodid, V. V., & Zabudchenko, V. M. (2013). Analiz konstruktsii tekhnichnykh zasobiv dlia vyrobnytstva volohykh vysokozasvoiuvanykh kormiv [Analysis of technical means designs for the production of moist, highly digestible feed]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 43, 179–185. [in Ukrainian].
10. Revenko, I. I., Brahynets, M. V., & Rebenko, V. I. (2009). *Mashyny ta obladnannia dlia tvarynnystva* [Machines and equipment for animal husbandry]. Kyiv: Kondor. [in Ukrainian].
11. Shatskiy, V. V., Milko, D. A., Boltianskiy, B. V., Kolomiiets, S. M., & Sementsov, V. I. (2013). Yakist zmishuvannia komponentiv ratsionu – osnova pidvyshchennia produktyvnosti tvaryn [The quality of feed

- ration mixing components as the basis for increasing animal productivity]. *Zb. nauk. prats Tavriiskoho derzh. ahrotekhnol. un-tu*, 1(3), 43–50. Melitopol. [in Ukrainian].
12. Shatskyi, V. V. (2012). Matematychni modeliuvannia dynamichnosti shchilnosti ta yakosti kormovoi sumishi dlia tvaryn [Mathematical modelling of density dynamics and feed mixture quality for animals]. *Nauk. visnyk Tavriiskoho derzh. ahrotekhnol. un-tu*, 2(2), 3–19. Melitopol. [in Ukrainian].
 13. Shabelnyk, B. P. (2002). *Teoriia ta rozrakhunok mashyn dlia tvarynnystva* [Theory and calculation of machines for animal husbandry]. Kharkiv: KhDTUSG. [in Ukrainian].
 14. Chernovol, M. I., Sviren, M. O., & Kisilov, R. V. (2018). Pryhotuvannia kormovykh sumishei kombinovanykh zmishuvachem [Preparation of feed mixtures with a combined mixer]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 2, 54–59 [in Ukrainian].

Ruslan Kisilyov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Petro Luzan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Volodymyr Amosov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykhailo Vasylykovskyi**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Research on the Influence of Mixer Design Parameters on the Quality of Feed Mixture Preparation

In connection with the transition of livestock farming to market principles, a long-term national program was developed aimed at increasing milk and beef production, reducing the cost of production, improving its quality, and comprehensive intensification of livestock farming. The main objectives of the program are to form a reliable feed base, increase its productivity and yield of grain and fodder crops, introduce modern feeding technologies, prepare feed for feeding, produce highly nutritious feed mixtures, and widely use complex mechanization and automation of production processes on farms and livestock complexes. Successful implementation of technical and breeding progress in high-yield milk and beef production primarily involves providing livestock with a sufficient amount of high-quality and biologically complete feed. Such rations must be balanced in terms of the content of organic nutrients, minerals, biologically active components, trace elements and micronutrients in accordance with the planned productivity, while maintaining the necessary level of vital activity and physiological state of the animals.

A generalized analysis of traditional machines and technical means for preparing feed mixtures for cattle showed that the existing mixers do not fully provide the necessary quality indicators in the manufacture of wet feed mixtures and have a number of significant shortcomings. In particular, the designs of mobile mixers are characterized by exceeding the regulatory indicators of specific metal content by 1.5–2 times, and energy consumption for driving the working elements by 3–4 times. Such significant shortcomings significantly limit the possibilities of their effective use on cattle farms.

The article considers a systematic approach to the technological process of mixing various components, which is presented in the form of a deterministic model of the functioning of a batch feed mixer at all stages of its operation - from loading raw materials to obtaining and unloading the finished mixture. Based on the conducted research, a technological scheme of a paddle mixer is substantiated, the design of which includes a housing with a loading neck and an unloading screw. Along the working chamber, flat blades with an appropriate pitch are rigidly fixed on the supports, ensuring mixing of the components. The lower part of the supports is equipped with radial fingers for loosening the compacted masses of the mixture in the housing. The blades are installed at the right and left angles of inclination of their working surface relative to the shaft axis, which contributes to intensive and uniform mixing.

Experimental studies have shown that the developed and substantiated technological scheme of the combined flat-blade feed mixer provides effective preparation of balanced complete feed mixtures for cattle to the degree of homogeneity established by the regulations.

During the studies, rational parameters of the mixer operation were determined: blade width - 45 mm, angle of inclination to the shaft axis - 50°, mixer shaft rotation frequency - 90 rpm, duration of the mixture formation process - 7 min. Taking into account the specified parameters, the design of the mixer provides a level of homogeneity of the feed mixture at the level of 92%.

feed mixer, feed mixture, daily ration, zootechnical requirements, livestock farming, feed mixture homogeneity

Одержано (Received) 07.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 628.3.004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.195-205](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.195-205)

В. В. Клименко¹, проф., д-р техн. наук, **Ю. А. Невдаха**¹, доц., канд. техн. наук,
О. В. Скрипник¹, доц., канд. техн. наук, **С. В. Конончук**¹, доц., канд. техн. наук,
В. І. Кравченко², доц., канд. техн. наук

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

²Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: uanepvdakha@ukr.net

Застосування шнекового методу пресування водовмісної композитної сировини на основі мулових осадів стічних вод для виготовлення дослідно-промислової партії композиційних біопаливних пелет

У статті представлено верифікацію виготовлення дослідно-промислової партії біопаливних композитних пелет на основі мулових осадів стічних вод із застосуванням модернізованого шнекового пристрою. За результатами проведених досліджень було виготовлено модернізований шнековий пристрій, визначена його продуктивність та потужності енергоспоживання. Досліджувалася вологість пелет порівняно з вологістю вихідної композитної сировини на основі мулових ОСВ, в результаті також були отримані характеристики біопаливних пелет, виготовлених на модернізованому шнековому пресі з композитної сировини на основі мулових ОСВ.

шнековий пристрій, пелет, композитна сировина, пресування, продуктивність, потужність

Постановка проблеми. При експлуатації систем очистки стічних вод на міських каналізаційних очисних спорудах (КОС) утворюються мулові осади стічних вод (МОСВ), кількість яких зростає з кожним роком [1]. В Україні КОС споруджувалися за технологічними схемами, якими не передбачено використання осадів стічних вод (ОСВ) [2]. Тому наразі розповсюдженими методами поводження з МОСВ є їх накопичення та тривале зберігання на мулових майданчиках(картах) [3]. Осади стічних вод містять шкідливі домішки і негативно впливають на довкілля, забруднюючи ґрунтові води, відкриті водойми та повітряний басейн [4, 5]. Оскільки кількість МОСВ невпинно зростає, то це потребує або розширення площ земельних ділянок для їх депонування, або, як альтернатива, вирішення проблеми ефективної утилізації свіжих МОСВ.

Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод» [6] зобов'язує суб'єкти господарювання, що забезпечують водовідведення, здійснювати облік обсягів утворення, обробки, зберігання та повторного використання МОСВ.

Серед перспективних напрямків обробки МОСВ для їх повторного використання можна виділити спосіб переробки за технологією термічної утилізації – метод, який набуває широкого розповсюдження в різних країнах [7 - 9]. Застосування такої технології дозволяє не тільки забезпечити утилізацію МОСВ, а і використати їх енергетичний ресурс в теплоенергетичних системах.

Однією з проблем термічної утилізації МОСВ є велика відмінність їх розмірів і форми після процесу зневоднення та пластично-в'язкі властивості.

Тому для підвищення ефективності рециклінгу МОСВ за технологією термічної утилізації доцільно спочатку виготовляти з них та композитів на їх основі біопаливо заданої форми у вигляді пелет або брикетів [10, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед способів переробки МОСВ можна виділити термічну утилізацію - перспективний метод, який набуває широкого розповсюдження в різних країнах (Babaiev V.M. et al, 2018; Fitili D., Zabaniotu A., 2008; Klius V.P. et al, 2018; Malhozata V. ta Mariush T., 2015; Zorina O.V., Mavrykin Ye. O. 2021) через постійне подорожчання енергії і підвищення вимог охорони природного середовища.

Вивченню питання термічної утилізації МОСВ і використанню їх енергетичного ресурсу з урахуванням підвищення вимог охорони довкілля приділяється увага в роботах (Babaiev V.M. et al, 2018; Fitili D., Zabaniotu A., 2008; Klius V.P. et al, 2018; Malhozata V. ta Mariush T., 2015; Zorina O.V., Mavrykin Ye. O. 2021). Зокрема в роботі (Babaiev). Порівняльний аналіз обробки МОСВ показали перевагу можливого використання технології термоутилізації з отриманням теплової та електричної енергії на очисних спорудах великих міст України перед технологією анаеробного зброджування мулових осадів з отриманням біогазу (Aneta Chekhovska-Kosatska et al, 2015; Babaiev V.M. et al, 2018; Klymenko V. V. et al, 2019).

В роботі [12] при оцінці технологічних сценаріїв термічної утилізації МОСВ запропоновано два основні варіанта виготовлення біопаливних пелет з МОСВ та композитів на основі МОСВ: 1) з попереднім підсушуванням до вологості 10 – 15 % (Варіант 1) після механічного зневоднення до вологості 75 – 80 % без попереднього підсушування (Варіант2).

В роботі [13] наведено результати проведених досліджень відповідно Варіанту1 виготовлення пелет для підготовки до впровадження на ОКВП «Дніпро-Кіровоград» термічної утилізації МОСВ: визначено фізико-технічні умови використання МОСВ для виробництва біопалива та експериментально апробовано виготовлення його зразків шляхом гідралічного пресування в закриту матрицю, показано доцільність використання композитної сировини для виготовлення біопалива на основі МОСВ. Для проведення експериментів з виготовлення композитних пелет використовувалися попередньо підсушені МОСВ та подрібнені рослинні відходи: опале листі, деревна тирса, а композитні пелети виготовлялися за методом сухого пресування. Отримані експериментальні зразки були доброї якості: мали густину $\rho \geq 1 \text{ г/см}^3$ і гладку зовнішню поверхню. Але для масового виробництва такий варіант є досить проблемним, оскільки окрім попереднього підсушування сировини передбачає використання складного та громіздкого пресового гідралічного обладнання.

В роботі [10] розглянуто питання ко-грануляції осадів стічних вод і біомаси та визначено щільність і твердість виготовлених КБП з мулових осадів стічних вод, китайської піхти, лушпиння рису. Авторами роботи [11] проведено дослідження дво - та трикомпонентних композитних палив, виготовлених на основі МОСВ та торфу, тирси, лушпиння гречки. За результатами досліджень зроблено висновок про можливість застосування технології переробки застарілих шламових відкладень мулових осадів стічних вод у композитне паливо на їх основі.

Хоча в роботах [10, 11] технології виготовлення КБП на основі МОСВ не вказуються, але за низьким вмістом води в окремих вихідних сировинних компонентах можна дійти висновку про застосування сухого або напівсухого методу гідралічного пресування.

Постановка завдання. Основною метою роботи є верифікація застосування шнекового методу пресування водовмісних пластичних матеріалів для виготовлення дослідно-промислової партії КБП на основі мулових осадів стічних вод.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити наступні основні завдання: обґрунтувати технологічні умови та виконати аналіз пресового обладнання, що застосовується для пресування водовмісних пластичних матеріалів на прикладі глини і глинистих сумішей; модернізувати і апробувати для виробництва дослідно-промислової партії КБП на основі МОСВО шнековий пресовий пристрій спрощеної конструкції; оцінити основні фізико-технічні властивості КБП з виготовленої дослідно-промислової партії: густину, вологість, зольність, теплоту згорання, які вагомо впливають на підбір обладнання для проведення теплотехнічних випробувань установки комбінованого рециклінгу МОСВ.

Виклад основного матеріалу. Для експериментальної верифікації виготовлення дослідно-промислової партії КБП на основі пластичних МОСВ використовувалися зразки мулових осадів стічних вод (МОСВ) з системи каналізаційних очисних споруд обласного комунального виробничого підприємства «Дніпро-Кіровоград» в м. Кропивницький та лушпиння соняшника. Цим підприємством було надано зразки МОСВ після центрифугування з технологічних мулових майданчиків КОС вологістю 75...80 % двох видів: сирий муловий осад (ОСВ-1) та надлишковий муловий осад (ОСВ-2), а лушпиння соняшника надало СФГ «Личук». При виборі лушпиння соняшника в якості рослинної складової композитної сировини виходили з того, що перше, воно є у великій кількості в Кіровоградській області, оскільки значна частина соняшника в Україні вирощується і переробляється саме в цьому регіоні, а по-друге, відходи оліє-жирових підприємств у вигляді лушпиння соняшника мають малу вологість (8...9 %) і досить високу теплоту згорання 20...22 МДж/кг [14].

Перед проведенням досліджень надані зразки мулових осадів ОСВ-1 і ОСВ-2 змішувалися у пропорції 1:1,5, оскільки в такій пропорції вони видаляються в процесі експлуатації КОС для механічного обезводнення на центрифугах. Для позначення такої суміші мулових осадів будемо вживати термін: активний муловий осад стічних вод.

Лушпиння соняшника подрібнювалися і просіювалися на лабораторному ситі № 3,5 (діаметр отворів 3,5мм).

Загальний вигляд зразків активного МОСВ і подрібненого лушпиння соняшника показано на рис.1



а - зразок активного МОСВ; б - зразок подрібненого лушпиння соняшника

Рисунок1 - Загальний вигляд зразків активного МОСВ і подрібненого лушпиння соняшника

Джерело: розроблено авторами

При проведенні експериментальних досліджень виготовлення дослідно-промислової партії КБП на основі мулових осадів стічних вод застосовувалася наступна послідовність: здрібнення та просівання лушпиння соняшника; підготовка суміші компонентів «активний МОСВ + лушпиння соняшника»; пресування суміші

компонентів у шнековому пристрої; підсушування вироблених КБП в природних умовах.

З урахуванням результатів раніше проведених досліджень виготовлення експериментальних зразків КБП з мулових осадів стічних вод ОКВП «Дніпро-Кіровоград» і опалого листя, рекомендовано для виготовлення дослідно-промислової партії КБП використовувати композитну сировину такого складу: 80 % - активні МОСВ, 20 % - лушпиння соняшника.

На початку дослідження вимірювалась вологість сировини за стандартною методикою (Karp I. M. et al, 2017).

Для визначення насипної щільності здрібненого лушпиння соняшника його засипали у попередньо зважений мірний циліндр об'ємом 0,05 дм³. Залишок лушпиння в циліндрі знімали металевою лінійкою. Після цього циліндр з лушпинням зважували і визначали насипну щільність за формулою:

$$\rho_i = \frac{m_1 - m_2}{V}, \quad (1)$$

де m_1 - маса мірного циліндра з лушпинням, кг;

m_2 - маса мірного циліндра без лушпиння, кг;

V - об'єм циліндра, м³.

Зважування мірних циліндрів здійснювали за допомогою електронних вагів з ціною поділу 1×10^{-5} кг.

При виборі пресового пристрою для виготовлення на основі мулових ОСВ дослідно-промислової партії біопаливних пелет приймалося до уваги, що надані зразки осадів є пластично-в'язкими матеріалами і композитна сировина, виготовлена на основі мулових осадів (80 %) та лушпиння соняшника (20 %) (КС-ОЛ) також буде мати пластичні властивості.

З відомих пластичних матеріалів, які найбільш близькі за властивостями до композитної сировини КС-ОЛ та широко використовуються в промисловості, є глини і глинисті розчини [15, 16].

Преси, що застосовуються для пластичного формування глини, глинистих та інших сумішей за конструкцією устрою, який пресує, підрозділяються на шнекові, поршневі і преси штампувальної дії [15, 16]. З них найбільше поширення одержали шнекові преси, які використовуються в промисловості протягом більш ста років.

Схемне рішення модернізованого шнекового пристрою для виготовлення дослідної партії біопаливних пелет на основі мулових осадів стічних вод представлено на рис.2а, а його загальний вид показано на рис. 2б.

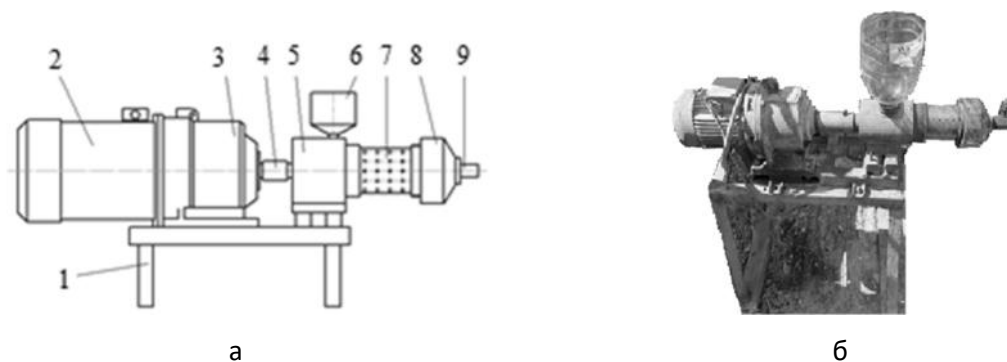
Обладнання експериментальної установки дозволяє виконувати випробування на стиск при максимальному навантаженні 50 кН.

Прес змонтований на рамі 1 і містить: електродвигун 2, редуктор 3, муфту 4, ємність для завантаження суміші 5, шнек 6, корпус шнека 7, формуючу голівку 8, мундштук 9.

Транспортування, пресування сировини та формування біопаливних пелет на основі мулових ОСВ здійснюється у голівці шнекового преса.

Модернізований шнековий пресовий пристрій працює наступним чином. Підготовлена сировина для виготовлення біопаливних пелет на основі мулових ОСВ загрузається в ємність 5, з якої подається в міжвитковий простір забірної частини шнека 6 (рис 2а).

Під дією нових порцій МОСВ, що надходять, і сил тертя між корпусом преса 7 і масою МОСВ остання, поряд з круговим обертанням разом зі шнеком, одержує осьове переміщення вздовж корпусу і шнека і входить по міжвитковому просторі в корпус циліндра 7, в зону транспортуючих витків шнека. Маса МОСВ постійно ущільнюється спочатку в міжвитковому просторі шнека забірної частини, а потім у зоні циліндра 7. З ростом щільності маси МОСВ росте і тиск її на стінки циліндра (корпуса) преса.



а - схемне рішення модернізованого шнекового пристрою для виготовлення біопаливних пелет на основі мулових осадів стічних вод; б - загальний вигляд шнекового пристрою для виготовлення біопаливних пелет на основі мулових осадів стічних вод

Рисунок 2 - Модернізований шнековий пристрій

Джерело: розроблено авторами

Пластинчата маса МОСВ повертається разом зі шнеком, що викликає просування її за один оберт шнека не на довжину кроку гвинта, а на розмір, менший кроку гвинта на 10...40 %. Величина просування пластинчастої маси за один оберт шнека оцінюється коефіцієнтом подачі шнека.

Із зони транспортуючих витків маса МОСВ надходить у зону кінцівика шнека з двозахідної випірною лопаттю. В площині закінчення випірної лопаті пластинчата маса МОСВ розвиває найбільший тиск на стінки корпусу й в осьовому напрямку, завдяки якому, проштовхується у формовочну частину голівки 8 і проходить через неї до мундштука 9, в якому набуває остаточної циліндричної форми діаметром $d = 16$ мм. З мундштука виходять циліндричні біопаливні пелети $d = 16$ мм.

Проведено повірочний розрахунок продуктивності та потужності енергоспоживання модернізованого шнекового преса для виготовлення дослідної партії біопаливних пелет на основі мулових ОСВ.

Основними елементами модернізованого шнекового преса є мотор-редуктор 1МПз 2 - 40 за ТУ2-056-208-82, який використовується для приводу шнека, та голівка шнекового преса. Технічні характеристики мотор-редуктора 1МПз 2 - 40 наведено в табл.1.

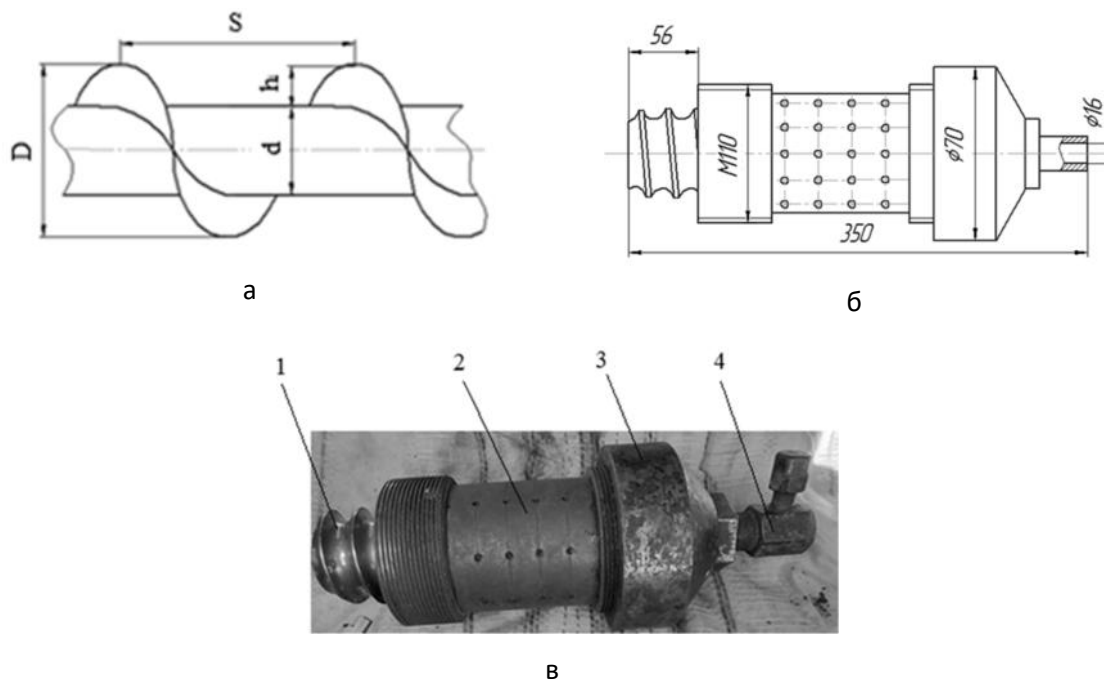
Таблиця 1 - Технічні характеристики мотор-редуктора 1МПз 2 – 40

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Частота обертання вихідного валу, n	об/хв	45
Момент на вихідному валу, Т	Нм	235
Встановлена потужність електродвигуна, Р _{ел.дв.}	кВт	1,1

Джерело: розроблено авторами

Основні геометричні характеристики голівки (розробка авторів) шнекового преса показано на рис. 3 та наведено в табл. 2.

Повіро́чний розрахунок продуктивності та потужності енергоспоживання модернізованого шнекового преса проводився з використанням методики, викладеної в роботі [14].



а - параметри шнека; б - голівка шнека зі шнеком; в - загальний вид голівки модернізованого шнекового пресу:

1 - забірна частина шнека; 2 - циліндр; 3 - формуюча частина голівки; 4 - мундштук

Рисунок 3 - Схема конструкції голівки шнекового преса

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 - Геометричні характеристики голівки шнекового преса

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Діаметр шнека, D	м	0,072
Крок гвинта шнека, S	м	0,022
Діаметр валу шнека, d	м	0,055
Висота лопаті, h	м	0,0085
Діаметр отвору мундштука, d ₁	м	0,016
Довжина шнека, L	м	0,280

Джерело: розроблено авторами

Для визначення продуктивності шнекового преса з достатньою точністю можна користуватися виразом [17]:

$$Q = \frac{\pi(D^2 - d^2)(S - \delta)K_3 n 60 \rho}{4}, \quad (2)$$

де D - зовнішній діаметр циліндричної вихідної частини шнека, м;

K₃ – коефіцієнт, що враховує усі чинники зменшення середньої осьової швидкості руху потоку сировини крізь перетин кінцевої секції; приймаємо K₃ = 0,35 [17];

d - діаметр основи шнека, м;

S - крок шнека, м;

δ – товщина лопаті, м;

n - частота обертання шнека, об/хв;

ρ - густина матеріалу на виході з преса, т/м³.

Потужність, яка витрачається шнеком P_{Σ} складається з потужності P_1 на створення у композитній сировині тиску, достатнього для подолання опору формувальних органів (умовно корисні витрати) та втрат потужності на тертя лопатей по сировині у зоні максимального тиску P_2 , транспортування сировини до цієї зони P_3 та роботу нагнітальних лопатей P_4 :

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (3)$$

При визначенні потужності P_1 на створення тиску у сировині можна з деяким спрощенням скористатися загально вживаною залежністю для розрахунку втрат потужності нагнітачем-насосом [17]:

$$P_1 = \frac{q Q_{\Pi}}{10^3}, \quad (4)$$

де $q = 5 \cdot 10^6$ Па, - заданий у вихідних даних тиск в пресовій голівці;

Q_{Π} , м³/с - об'ємна продуктивність (подача сировини нагнітачем)

$$P_2 = \frac{2\pi f q (R^3 - r^3) \omega}{3 \cdot 1000}, \quad (5)$$

де $\omega_{ш} = 4,71$ - кутова швидкість шнека, с⁻¹;

$f = 0,3$ - коефіцієнт тертя сировини по поверхні шнеку під тиском.

Витрати потужності P_3 на транспортування сировини до зони тиску, куди входять й витрати на попереднє ущільнення, а також P_4 на роботу пристроїв нагнітання сировини у шнек у порівнянні із першими двома складовими незначні, звичайно не перевершують 20 % від їх суми і можуть враховуватись спрощено при розрахунку сумарної потужності:

$$P_{\Sigma\Pi\Pi} = K_{\text{тр}} \cdot K_{\text{д}} \cdot (P_1 + P_2), \quad (6)$$

де $K_{\text{тр}} = 1,15 \dots 1,3$ - коефіцієнт врахування P_3 і P_4 ;

$K_{\text{д}} = 1,05 \dots 1,15$ - коефіцієнт врахування втрат потужності на тертя у підшипниках та ущільненнях шнекового вала.

По скільки привод виготовлений індивідуально потужність двигуна визначається по формулі [17]:

$$P_{\text{дв}} = K_{\text{зап}} \cdot \frac{P_{\Sigma\Pi\Pi}}{\eta}, \quad (7)$$

де $K_{\text{зап}} = 1,05 \dots 1,1$ - коефіцієнт запасу потужності двигуна;

$\eta = 0,85 \dots 0,9$ - ККД привода.

Проведене тестування модернізованого шнекового пристрою для виготовлення дослідно-промислової партії біопаливних пелет на основі мулових ОСВ.

Пресування сировини та виготовлення біопаливних пелет на основі мулових ОСВ здійснювалося у голівці модернізованого шнекового преса, конструктивна схема конструкції якої приведена на рис. 3а, б, а загальний вид показано на рис. 3в.

Для виготовлення дослідно-промислової партії біопаливних пелет на основі мулових ОСВ використовувалася композитна сировина в складі: мулові ОСВ після центрифуги (вологість $W_{\text{МОСВ}} = 72\%$) - 80 %, лушпиння соняшника (вологість $W_{\text{л.с}} = 9\%$) - 20 %.

Компоненти ретельно перемішувалися у відкритій посудині до досягнення стану однорідної суміші. Потім включалося живлення мотор-редуктора і шнековий пристрій працював від 5 до 10 хв на холостому ході.

Після цього підготовлена композитна біосировина вручну завантажувалася у ємність 5 (рис. 2а) і з неї поступово надходила у міжвитковий простір забірної частини шнека 1 (рис. 3в) і транспортувалася до формуючої частини голівки 3 рис 3в. При цьому маса біосировини постійно ущільнювалася і відповідно зростав тиск на стінки циліндра (корпуса) преса і в осьовому напрямку. Завдяки цьому біосировина проштовхується у формовочну частину голівки 3 і проходить через неї до мундштука 4, в якому набуває остаточної циліндричної форми (рис. 4). З мундштука виходять циліндричні біопаливні пелети $d = 16$ мм, загальний вид яких показано на рис. 5.



Рисунок 4 - Загальний вид формуючої частини голівки і мундштука шнекового преса в ході процесу виготовлення дослідно-промислової партії біопаливних пелет на основі мулових ОСВ

Джерело: розроблено авторами



а



б

а - біопаливні пелети, з композитної сировини; б - біопаливні пелети на основі мулових осадів стічних вод ОКВП «Дніпро-Кіровоград»

Рисунок 5 - Загальний вигляд біопаливних пелет ($d = 16$ мм), виготовлених на модернізованому шнековому пресі, розміщених для просушування в умовах відкритої атмосфери

Джерело: розроблено авторами

Основні характеристики біопаливних пелет, виготовлених на модернізованому шнековому пресі з композитної сировини на основі мулових ОСВ ОКВП «Дніпро-Кіровоград» наведені в табл. 3.

Таблиця 3 - Основні характеристики біопаливних пелет, виготовлених на модернізованому шнековому пресі з композитної сировини на основі мулових ОСВ ОКВП «Дніпро-Кіровоград»

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Склад композитних пелет:		
- мулові осади стічних вод	%	80
- лушпиння соняшника	%	20
Діаметр пелет, d	мм	16
Густина пелет на виході зі шнекового пресового пристрою, ρ	кг/м ³	1010
Вологість підсушених пелет, W	%	23
Зольність, A	%	33
Теплота згорання (розрахована), Q	МДж/кг	21,6
Загальна маса виготовлених пелет, m_n	кг	50

Висновки. Досліджено шнековий пристрій спрощеної конструкції проведено перевірений розрахунок продуктивності та потужності енергоспоживання шнекового преса обґрунтовані його технологічні умови та проведено апробування. Випробування модернізованого шнекового пристрою для виготовлення дослідно-промислової партії біопаливних пелет на основі мулових осадів стічних вод підтвердило його працездатність Але, в ході виготовлення не вдалося досягнути суттєвого зниження вологості пелет порівняно з вологістю вихідної композитної сировини на основі мулових ОСВ. Частково це пов'язано з відносно великим розміром отворів ($d = 4$ мм) в корпусі циліндра, які призначалися для планованого відводу рідини при пресуванні сировини. Проте виявилось, що при підвищенні тиску орієнтовно до 5 МПа через ці отвори почала виходити сировина, а не рідина, що не дозволило підвищити тиск пресування до більш високих величин.

Зменшення вологості виготовлених пелет в межах від 7 до 10 % спостерігалось при місцевому малопотужному підігріві циліндра шнекового преса до 45...50 °С. Тому для зниження вологості до меншої величини виготовлені біопаливні пелети підсушували в умовах відкритої атмосфери, як правило протягом ≤ 24 год, до вологості $\approx 18...25$ %.

Список літератури

1. Sniezhkin Yu., Petrova Z., Paziuk V., Novikova Y. State of wastewater treatment technologies in Ukraine and the world. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. Vol. 43 (1). P. 5–12. DOI: 10.34133/2019/7507131 (in Ukrainian).
2. Карп І. М., П'яних К. Є., Нікітін Є. Є. Проблема утилізації та знешкодження мулових осадів міських стічних вод і шляхи її вирішення (Огляд). *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2017. № 2. С. 35–48.
3. Іванова І. М. Розроблення рекомендацій щодо збереження земель завдяки утилізації вмісту мулових карт. *Технічні науки та технології*. 2015. № 1. С. 191–199.
4. Dregulo A. M., Bobylev N. G. Integrated Assessment of Groundwater Pollution from the Landfill of Sewage Sludge. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22 (1). P. 68–75. DOI: 10.12911/22998993/128872

5. Горох Н. П. Екологічна оцінка шкідливих речовин під час комплексної утилізації муніципальних відходів. *Комунальне господарство міст*. 2005. № 63. С. 171–181.
6. Про водовідведення та очищення стічних вод : Закон України від 12.01.2023 № 2887-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20#Text> (дата звернення: 25.04.2025).
7. Karp I. M., Pyanykh K. Ye., Nikitin Ye. Ye. Problem of sewage sludge utilization and neutralization and a ways of its decision. *Energotehnologii i resursoberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. № 2. P. 25–38 (in Ukrainian).
8. Добровольська О. Г. Перероблення відходів комунальних підприємств : навч.-метод. посіб. для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спец. 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньо-проф. програми «Міські інженерні мережі». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 22 с.
9. Karp I. M., Pyanykh K. E., Nikitin E. E. Problema utilizatsii ta zneshkodzhenia mulovykh osadiv miskikh stichnykh vod ta shliahi ii vyrishenia (oglyad). *Energotehnologii i resursoberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. № 2. P. 35–48 (in Ukrainian).
10. Кравченко В. І., Білоус Ю. В., Кравченко В. П. Створення та обґрунтування композитного палива на основі осаду стічних вод. *Таврійський науковий вісник. Сер. Технічні науки*. 2023. Вип. 3. С. 88–94.
11. Кравченко В. І. Виготовлення та експериментальна оцінка біопалива на основі осадів стічних вод для одержання теплової енергії та будівельного матеріалу. *Вісник ХНТУ. Сер. Технічні науки*. 2024. № 2. С. 32–37.
12. Карп І. М., П'яних К. Є., П'яних К. К. Очистка і переробка відходів. *Енерготехнології і ресурсобереження*. 2019. № 2. С. 34–48.
13. Klymenko V., Kravchenko V., Koltun P., Nevdakh Yu., Zavodyannyi V. Evaluation of Technological Scenarios for Production of Composite Biofuels Based on Communal Waste. In: *Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change*. 2025. P. 20.
14. *Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів* : монографія / за ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.
15. Суббота І. С., Спасьонова Л. М., Тобілко В. Ю. Хімічна технологія кераміки : підруч. для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія». Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 178 с.
16. Болтянська Н. І., Комар А. С. Аналіз конструкцій пресів для приготування кормових гранул та паливних брикетів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. № 8 (2). С. 1–12.
17. *Основи проектування одночерв'ячних екструдерів* : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с.

References

1. Sniezhkin, Yu., Petrova, Z., Paziuk, V., & Novikova, Y. (2021). State of wastewater treatment technologies in Ukraine and the world. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 43(1), 5–12. <https://doi.org/10.34133/2019/7507131> [in Ukrainian].
2. Karp, I. M., Pyanykh, K. Ye., & Nikitin, Ye. Ye. (2017). Problem of utilization and neutralization of sewage sludge of municipal wastewater and ways to solve it (Review). *Energy Technologies and Resource Saving*, (2), 35–48 [in Ukrainian].
3. Ivanova, I. M. (2015). Development of recommendations for land conservation through the utilization of sludge card content. *Technical Sciences and Technologies*, (1), 191–199 [in Ukrainian].
4. Dregulo, A. M., & Bobylev, N. G. (2021). Integrated assessment of groundwater pollution from the landfill of sewage sludge. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 68–75. <https://doi.org/10.12911/22998993/128872>.
5. Horokh, N. P. (2005). Ecological assessment of harmful substances during complex utilization of municipal waste. *Municipal Economy of Cities*, (63), 171–181 [in Ukrainian].
6. Verkhovna Rada of Ukraine. (2023, January 12). On wastewater disposal and treatment: Law of Ukraine № 2887-IX. Retrieved April 25, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20#Text> [in Ukrainian].
7. Karp, I. M., Pyanykh, K. Ye., & Nikitin, Ye. Ye. (2017). Problem of sewage sludge utilization and neutralization and ways of its decision. *Energotehnologii i resursoberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, (2), 25–38 [in Ukrainian].
8. Dobrovolska, O. H. (2021). Processing of municipal enterprise waste: Educational-methodical manual for bachelor's degree students, specialty 192 "Construction and civil engineering", educational-professional program "Urban engineering networks". Zaporizhzhia: ZNU [in Ukrainian].

9. Karp, I. M., Pianykh, K. E., & Nikitin, E. E. (2017). Problema utilizatsii ta zneskhodzhennia mulovykh osadiv miskikh stichnykh vod ta shliahy ii vyrishennia (ohliad). *Energotehnologii i resursoberezhennia [Energy Technologies and Resource Saving]*, (2), 35–48 [in Ukrainian].
10. Kravchenko, V. I., Bilous, Yu. V., & Kravchenko, V. P. (2023). *Creation and justification of composite fuel based on sewage sludge. Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (3), 88–94 [in Ukrainian].
11. Kravchenko, V. I. (2024). *Production and experimental evaluation of biofuel based on sewage sludge for obtaining thermal energy and building material. Bulletin of KhNTU. Technical Sciences*, (2), 32–37 [in Ukrainian].
12. Karp, I. M., Pyanykh, K. Ye., & Pyanykh, K. K. (2019). *Wastewater treatment and processing. Energy Technologies and Resource Saving*, (2), 34–48 [in Ukrainian].
13. Klymenko, V., Kravchenko, V., Koltun, P., Nevdakha, Yu., & Zavodyannyi, V. (2025). Evaluation of technological scenarios for production of composite biofuels based on communal waste. In *Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change* (p. 20).
14. Klymenko, V. V. (Ed.). (2017). *Technological foundations of biofuel production from plant waste and their composites: Monograph*. Kropyvnytskyi: PP “Ekskliuzyv-System” [in Ukrainian].
15. Subbota, I. S., Spasionova, L. M., & Tobilko, V. Yu. (2022). *Chemical technology of ceramics: Textbook for students of specialty 161 “Chemical technologies and engineering”*. K.: KPI named after I. Sikorskyi [in Ukrainian].
16. Boltianska, N. I., & Komar, A. S. (2018). *Analysis of press designs for the preparation of feed pellets and fuel briquettes. Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University*, 8(2), 1–12 [in Ukrainian].
17. Mikulionok, I. O., Sokolskyi, O. L., Sivetskyi, V. I., & Radchenko, L. B. (2015). *Fundamentals of single-screw extruder design: Textbook*. Kyiv: NTUU “KPI” [in Ukrainian].

Vasyl Klymenko¹, Prof., Doctor of Technical Sciences, **Yurii Nevdakha**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Skrypnyk**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Kononchuk**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Kravchenko**², Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Kherson State Agrarian and Economic University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Application of the Screw Method of Pressing Water-Containing Composite Raw Materials Based on Sewage Sludge for the Manufacture of a Pilot Batch of Composite Biofuel Pellets

The technological conditions for the production of a pilot batch of biofuel pellets based on sewage sludge from the Dnipro-Kirovograd wastewater treatment plant are substantiated, taking into account their plastic properties. An analysis of the pressing equipment used for pressing water-containing plastic materials was carried out on the example of clays and clay mixtures. A screw press device of a simplified design was selected and tested for the production of a pilot batch of biofuel pellets based on the MOSS of the OKVP ‘DNIPRO-KIROVOGRAD’. The method of calculation of a screw press device of a simplified design and the algorithm of its application are described, and its verification calculation is performed. The main physical and technical properties of biofuel pellets from the manufactured pilot batch were evaluated: density, moisture content, ash content, calorific value.

During the experiments, it was not possible to achieve a significant reduction in the moisture content of the pellets compared to the moisture content of the original composite raw material based on sewage sludge. This is partly due to the relatively large size of the holes in the cylinder body, which were intended for the planned drainage of liquid during the pressing of raw materials. However, it turned out that when the pressure was increased to about 5 MPa, raw materials, not liquid, began to flow out through these holes, which made it impossible to increase the pressing pressure to higher values.

A decrease in the moisture content of the manufactured pellets in the range of 7 to 10 % was observed with local low-power heating of the screw press cylinder to 45...50 °C. Therefore, to reduce the moisture content to a lower value, the manufactured biofuel pellets were dried in an open atmosphere, usually for ≤ 24 h, to a moisture content of ≈18...25 %.

screw device, pellet, composite raw materials, pressing, productivity, power

Одержано (Received) 23.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

УДК 631.308.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.206-216](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.206-216)

Б. І. Котов¹, В. Г. Мироненко², С. П. Погорілий³, проф., д-р техн. наук,
В. О. Грищенко³, Ю. І. Панцир¹, доц., канд. техн. наук

¹Подільський державний університет, Кам'янець-Подільський, Україна

²Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України

³Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
e-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Аналіз процесів вібропневмосепарації зернових матеріалів з точки зору завдань керування

У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності процесу повітряно-решітної вібропневмосепарації зернових матеріалів шляхом використання пульсуючого повітряного потоку. Встановлено, що псевдозрідження зернового шару під дією коливань і повітряного тиску надає йому властивості в'язкої рідини, що дозволяє інтенсифікувати розшарування зернової маси за розміром, густиною та масою частинок. На основі теоретичних досліджень сформульовано аналітичні та напівемпіричні залежності, які описують взаємозв'язок швидкості занурення частинок із кінематичними та аеродинамічними параметрами процесу. Доведено доцільність застосування двоконтурної автоматизованої системи керування, яка забезпечує гнучке регулювання частоти коливань і параметрів подачі повітря.

математичне моделювання, віброзріджений шар, алгоритм, зерно, напівемпіричні залежності

Постановка проблеми. Вібропневмосепаратори широко використовуються для вторинної сепарації зерна та розділення насіннєвого матеріалу і видалення важковідокремлюваних домішок. Інтенсивне розшарування зернової маси на коливних поверхнях під дією полів сил тяжіння, інерції та тиску повітряного потоку сприяє переведенню зернового шару зернового матеріалу у псевдозріджений стан і надає йому властивості в'язкої рідини, що дозволяє розділити компоненти за різними ознаками: розмір, вага, густина.

Основою підвищення ефективності сепарації (збільшення продуктивності чіткості поділу зернового потоку на компоненти) решітно-повітряних машин є суттєва інтенсифікація сепарації частинок різного розміру, маси і густини, і переміщення в псевдозрідженому шарі. Але наявність одночасної дії різних механічних і гідродинамічних впливів на зернову масу суттєво ускладнює забезпечення раціональних режимів перебігу процесу поділу.

Вірогіднісно-статистичний характер процесів повітряно-решітної-вібраційної сепарації зернових матеріалів зумовлює необхідність розробки і застосування автоматичної системи керування режимами поділу зернової суміші на окремі компоненти, які забезпечать максимальну продуктивність (пропускну здатність) і кондиційну якість продукту. При розробці (синтезу) системи автоматизованого керування важливим питанням є обґрунтуванням управляючих параметрів і регульованих показників.

В практиці автоматизації решітних машин знайшли застосування стабілізація завантаження решітної частини машини (навантаження на решето або опорну поверхню), а основним регулюючим параметром частота коливання решета. Але зміна частоти коливань приводить до зміни швидкості переміщення зерна і, відповідно, висоти шару зерна, що в свою чергу є збурюючим фактором. Тому для ефективного керування процесом вібропневмосепарації більш гнучке регулювання контрольованих параметрів з використанням декількох контурів регулювання і корекції установок регуляторів. Для

виявлення впливу зміни регулюючих параметрів на перебіг процесу переміщення та перерозподілу частинок у зерновому шарі необхідно сформулювати та дослідити математичні моделі переміщення частинок всередині шару і переміщення шару зерна вздовж опорної поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення конструювання і результати розрахунків параметрів машин для сепарації зерна наведено у фундаментальній роботі [1]. Результати теоретичних і експериментальних досліджень віброповітряних машин для сепарації зерна висвітлені в монографіях [2-4]. Визначення діючих факторів, впливу силової взаємодії частинки і вібропневмозрідженого шару на переміщення частинки в шарі, наведено в роботі [5]. Там же дано спрощену методику побудови математичної моделі, що визначає швидкість переміщення частинки в шарі.

В зазначених роботах обґрунтовано високу ефективність застосування віброповітряної сепарації для розділення зернового матеріалу на вібраційних решетах за розміром і поділу зернової суміші за густиною на безпровальних решетах.

Прогресивним напрямком інтенсифікації процесів безрешітної сепарації зернових матеріалів слід вважати застосування пульсуючих повітряних потоків [6-9].

Використання пневмоімпульсних повітряних потоків для інтенсифікації перерозподілу частинок у шарі зерна має певні переваги для керування процесом поділу зерна, оскільки дає можливість здійснювати керуючий вплив шляхом зміни швидкості повітря та частоти коливань. Але застосування пульсуючих потоків на переміщення окремої зернівки у віброзрідженому шарі практично не розглядалось, також як і переміщення частинки вздовж віброуючої поверхні.

Постановка завдання. Визначити вплив кінематичних та аеродинамічних параметрів на переміщення частинки у вібропневмозрідженому шарі та вздовж опорної коливної поверхні.

Виклад основного матеріалу. Ступінь зрідження шару зерна під дією вібрацій та пульсацій повітряного потоку може бути оцінена за величиною швидкості занурення модельної частинки (відношенню глибини занурення до часу занурення). Цей параметр можна визначити експериментально, або розрахувати за попередньо сформульованою математичною моделлю. Оскільки на результати експерименту можуть діяти випадкові фактори, методикою дослідження передбачено аналітичне вирішення задачі і експериментальною перевіркою отриманих результатів досліджень. Швидкість занурення частинки визначається b занурення за час Δt .

За основу формулювання математичної моделі опису досліджуваного процесу прийнято фізико-механічну модель переміщення «товарної»-прохідної частки в коливному середовищі дисперсного (сипкого) матеріалу, густина частинок якої відрізняється від густини (m маси) частинки «товарної» фракції. Математичною формою моделі є рівняння відносного руху частинки у коливному (цільному) середовищі:

$$m_1 \frac{d\bar{v}}{dt} = m_0 (\Delta - 1) \left(g - \frac{d\bar{u}}{dt} \right) + F(\bar{V}) + \bar{R}(V), \quad (1)$$

де $\bar{V}$ – швидкість руху частинки відносно середовища, $\bar{u}$ – абсолютна швидкість середовища в точці, яка співпадає з центром тяжіння частинки (швидкість переносного руху), m_1, m_0 – маса частинки та маса середовища в об'ємі частинки, $\Delta = m/m_0 - m_1 = m' + m_0$ (де m' – приєднана маса), $F(\bar{V})$ – сили опору відносному руху частинки в середовищі, $\bar{R}(V)$ – сила тиску повітряного потоку.

$$\begin{cases} \overline{m}\ddot{x} = \overline{m}g \sin \alpha \pm \overline{m}A\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - R_x \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - K_n(V_n - \dot{x})^2 \cos \gamma \\ \overline{m}\ddot{y} = \overline{m}g \cos \alpha \pm \overline{m}A\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - R_y \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - K_n(V_n - \dot{y})^2 \sin \gamma \end{cases}, \quad (5)$$

де $\overline{m} = m_0(\Delta - 1)$, $\dot{x} = dx/dt$, $\dot{y} = dy/dt$, $\ddot{x} = d^2x/dt^2$, $\ddot{y} = d^2y/dt^2$, K_n – коефіцієнт опору повітряного потоку, V_n – швидкість частинки в шарі, γ – кут нахилу повітряного потоку до деки.

Розв'язок системи нелінійних рівнянь у вигляді траєкторії частинки $x(y)$ можна отримати чисельним методом із використанням комп'ютерних програмних середовищ за визначених значень сили опору середовища переміщенню частинки R_x та R_y . Сили опору в різних напрямках руху частинки мають різні значення, бо, як відомо, під час накладення на шар зернівок некруглої форми окремі зернівки орієнтуються довгою віссю в напрямку руху [12].

Використовуючи коефіцієнт ефективної вібров'язкості й ототожнюючи рух тіла у вібропневмозрідженому шарі з рухом тіла та в'язкій рідині [11], силу опору можна визначити за законом Стокса, враховуючи незначні швидкості занурення частинки. Тоді

$$\overline{R}_{x,y} = 3\pi\mu_{ef}d_{x,y}\overline{V} = K_{c\,x,y}\overline{V}, \quad (6)$$

де $\mu_{ef}(A\omega_1^2) = f_1(\varepsilon)$ – коефіцієнт ефективної вібров'язкості, $\varepsilon = f_2(A\omega_1^2)$ – порозність вібропневмозрідженого шару, $d_{x,y}$ – еквівалентні діаметри частинки в проєкціях на осях ОХ, ОУ.

Враховуючи, що $V_n \gg V$, силу опору повітряного потоку визначимо за формулою:

$$R = K_n V_\phi, \quad (6a)$$

де $V_\phi = V_n/\varepsilon$ – швидкість обтікання (фільтрації), $K_n = \xi(\text{Re}) \frac{S\rho}{2m}$ – коефіцієнт опору

середовища (де $\xi(\text{Re}) = 13/\sqrt{d_k}$), $d_k = \frac{1}{3} \frac{d_e \varepsilon}{1 - \varepsilon}$ – діаметр повітряного каналу в шарі зерна.

З урахуванням (6a) систему рівнянь (5) можна записати у вигляді лінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Приймаючи, що $V_n \gg V_x, V_y$, матимемо:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + K_{cx} \frac{dx(t)}{dt} = -K_{nx} V_n^2 - G_{mx} + A_x \sin \omega t; \quad (7)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + K_{cy} \frac{dy(t)}{dt} = -K_{ny} V_n^2 - G_{my} + A_y \sin \omega t, \quad (8)$$

де $K_{nx} = K_n \cos \frac{\gamma}{m}$, $K_{ny} = K_n \sin \frac{\gamma}{m}$, $G_{mx} = g \sin \alpha$, $G_{my} = g \cos \alpha$, $K_{cx} = K_{cy} = K_c/m$, $A_x = A\omega^2 \cos \beta$, $A_y = A\omega^2 \sin \beta$.

Величини коефіцієнтів K_{cx}, K_{cy}, K_n у першому наближенні можна визначити, використовуючи напівемпіричні залежності з роботи [13].

Сила опору визначена на основі аналізу впливу сил бокового тиску з боку частинок шару зерна та коефіцієнта внутрішнього тертя f під дією коливання середовища зі швидкістю $A\omega$:

$$R_c = \frac{6}{5} r^2 f_1 \rho_t (1 - \varepsilon (V_{n1} \omega^2 A)) \frac{V}{A\omega} h_i = K_{c,x,y} \bar{V}; \quad (9)$$

$$\varepsilon = 0.293 \cdot 1.44^{V_n} \cdot 1.33^{A\omega^2}; \quad (10)$$

$$K_n = \frac{13S\rho}{2m} \left(\sqrt{\frac{1}{3} \frac{d_e \varepsilon}{(1-\varepsilon)}} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Для визначення вихідних параметрів рівнянь (7), (8) густину середовища ρ_0 (або масу частинок середовища m_0), коефіцієнт опору середовища K_c та коефіцієнт опору повітряного потоку K_n за результатами експерименту використано методику [8] та експериментальну установку, що функціонує за схемою (рисунок 2), в якій пневмозріджений шар отримує гармонійні коливання $A \sin \omega t$ у горизонтальній площині ($\beta = 0$).

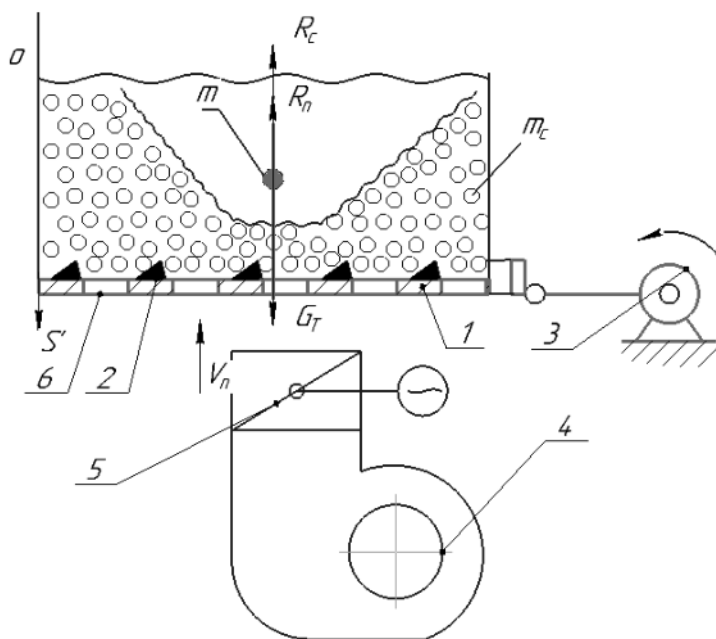


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на частинку в пневмовіброзрідженому шарі:

- 1 – перфорована коливна дека; 2 – асиметричні рифи для надання шару матеріалу горизонтального переміщення; 3 – вібратор гармонійних коливань; 4 – вентилятор; 5 – пульсатор; 6 – перфоровані поверхні

Джерело: розроблено авторами

Горизонтальні коливання поверхні з рифами сприяють інтенсивному перерозподілу частинок за висотою шару, а дія повітряного тиску змінює орієнтацію частинок [4, 12] та величину площі міделевого перетину, яка впливає на опір.

Вертикальне переміщення частинки в пневмовіброзрідженому шарі можемо визначити використовуючи рівняння (7) (при $\beta = 0$, $\alpha = 0$) записане у вигляді:

$$m \frac{d^2 S'}{dt^2} + K_c \frac{dS'}{dt} = K_n V_\phi^2 - (\Delta - 1) m_0 g, \quad (12)$$

де S' – переміщення частинки у вертикальному напрямку (занурення), $\Delta = m_0/m$, K_c – коефіцієнт опору товарної частинки від взаємодії з окремими зернами (внутрішнє тертя), K_n – коефіцієнт опору повітряному потоку, що фільтрується через шар зерна.

Розв'язок рівняння за початкових умов $t = 0$, $S' = 0$, $dS'/dt = 0$, отримано у вигляді:

$$S'(t) = at + \frac{m}{K_c} a \left(1 - e^{-\frac{K_c}{m} t} \right), \quad (13)$$

$$\text{де } a = \frac{-K_n V_n + (\Delta - 1) m_0 g}{K_c}.$$

У рівнянні три невідомі: a , K_c , m_0 , які визначено числовим розв'язком системи рівнянь, складеної з рівняння (10), записаного для декількох проміжків часу t_i у вигляді $S'_i = f(t_i)$ (при $i \geq 3$) за методикою [8] (рисунк 3).

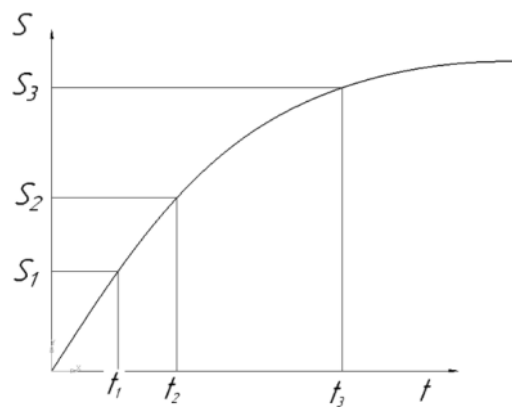


Рисунок 3 – Схема для розрахунку швидкості занурення

Джерело: розроблено авторами

Швидкість було визначено за очевидними співвідношеннями: $V_1 = S_1/t_1$, $V_2 = (S_2 - S_1)/(t_2 - t_1)$, $V_3 = (S_3 - S_2)/(t_3 - t_2)$, ...

За означеною схемою та методикою [8], використовуючи експериментальні дані роботи [11] визначено коефіцієнти K_c та K_n в залежності від частоти коливань опорної поверхні (решета) і швидкості повітря (під решетом). На графіках (рисунк 4) наведено залежності $K_c(\omega)$, $K_c(V_n)$ та $K_n(V_n)$.

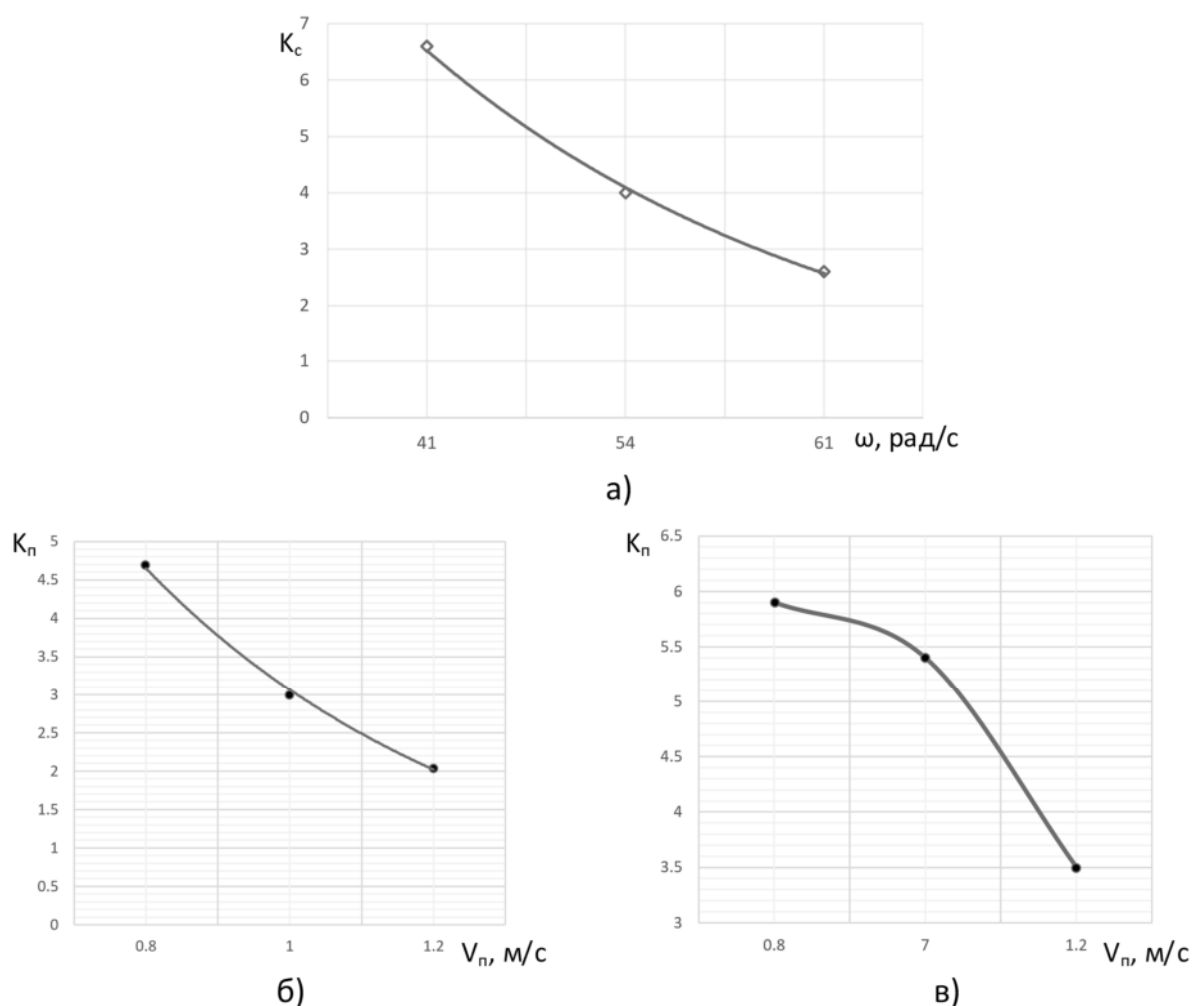


Рисунок 4 – Графічні залежності коефіцієнтів: ефективного опору від частоти коливань робочої поверхні (а), ефективного опору (б) та опору (в) від швидкості повітря
 Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зазначити наступне. Найбільш суттєву дію на швидкість занурення частинки надають частота коливань опорної поверхні та витрата повітря, що надається від решето. Але збільшення швидкості повітря більше, ніж 1.2 м/с робить коливання шару зерна нестійким, що суттєво зменшує ефективність дії цього параметру в якості регулюючого.

Застосування імпульсної подачі повітряного потоку може дозволити збільшення величини подачі повітря при зменшенні часу дії на частинку. Тобто застосовуючи пульсувальний потік повітря, можна за рахунок зміни часу дії імпульсу сили (при однаковій швидкості потоку) змінювати величину аеродинамічної сили, яка впливає на зерновий шар, зменшуюючи його опір переміщенню товарної частки.

При використанні пульсуючого повітряного потоку повітря математично важко описати дискретно-періодичну зміну швидкості повітря, що подається через жалюзійне решето, тому в першому наближенні можна прийняти зміну швидкості повітря за гармонічним законом і описати рівнянням:

$$V_a = A_0 + A_2 \sin \omega_2 t, \quad (14)$$

де A_2 – амплітуда коливань швидкості повітря, A_0 – зміщення лінії симетрії коливань відносно початку координат.

Якщо $A_0 = A_2$ рівняння (14) прийме вигляд:

$$V_a(t) = A_2(1 + \sin \omega_2 t). \quad (15)$$

Параметри процесу руху частинки в коливальному середовищі описуються рівняннями (7) і (8) з урахуванням пульсації потоку (15) за допомогою обчислювальних методів набувають вигляду:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + K_x \frac{dx(t)}{dt} = G_x + A_{1x} \sin \omega_1 t + A_{2x} (1 - \sin \omega_2 t)^2; \quad (16)$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + K_y \frac{dy(t)}{dt} = G_y + A_{1y} \sin \omega_1 t + A_{2y} (1 - \sin \omega_2 t)^2, \quad (17)$$

де $G_x = \frac{m-m_0}{m} g \sin \alpha$, $G_y = \frac{m-m_0}{m} g \cos \alpha$, $A_{1x} = \frac{m-m_0}{m} A_1 \omega_1^2 \cos \beta$,

$A_{1y} = \frac{m-m_0}{m} A_1 \omega_1^2 \sin \beta$, $A_{2x} = K_v A_2^2 \cos \gamma$, $A_{2y} = K_v A_2^2 \sin \gamma$, K_v – коефіцієнт вітрильності.

Початкові умови до системи рівнянь (16) і (17) запишемо у вигляді: $t=0$, $x=y=0$, $\dot{x}(0)=x_0$, $\dot{y}(0)=y_0$, $\dot{x}_0=v_{0x}$, $\dot{y}_0=v_{0y}$.

Підставляючи значення визначених експериментально коефіцієнтів опору за розв'язком рівнянь (16) та (17) отримано залежності переміщення частинки від часу і, відповідно, середню швидкість занурення (рисунок 5).

Процес переміщення шару матеріалу моделюється рівнянням переміщення матеріальної точки по нахиленій на кут α поверхні, яка здійснює коливальний рух у вертикальній площині за гармонійним законом $A \sin \omega t$ [14, 15].

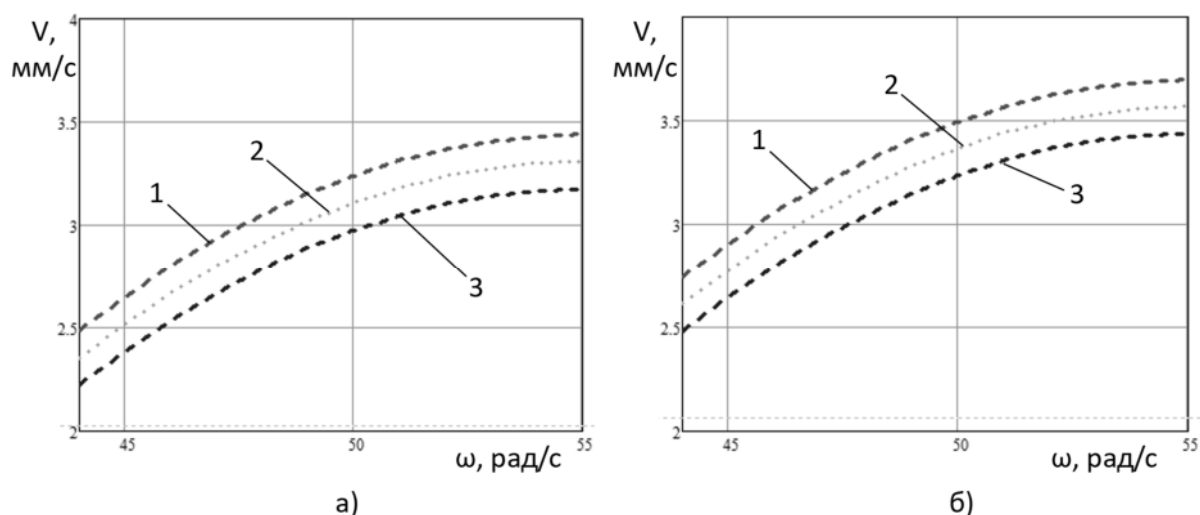


Рисунок 5 – Залежність швидкості занурення частинки від частоти коливань і швидкості повітря при постійному (а) та імпульсно-періодичному (б) потоці:

1 – $V_n=1.2$ м/с, 2 – $V_n=1.0$ м/с, 3 – $V_n=0.8$ м/с

Джерело: розроблено авторами

За умови сумісної дії на частинку коливної площини та висхідного потоку повітря відомі рівняння відносного руху частинки можна записати у вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m A \omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha - f N ; \quad (18)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = m A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N + R_n , \quad (19)$$

де f – коефіцієнт тертя, R_n – сила тиску повітря, N – нормальна реакція.

Рівняння записані для руху частинки вздовж осі ОХ.

Для відносного руху без підкидання частинки ($d^2 y / dt^2 = 0$), що дозволяє з рівняння (19) визначити нормальну реакцію $N = mg \cos \alpha - A m \omega^2 \sin \beta \sin \omega t - R_n$, та підставляючи значення N в рівняння (19), після скорочень та перетворень матимемо:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = A \omega^2 (\cos \beta + f \sin \beta) \sin \omega t - g (\sin \alpha + f \cos \alpha) - f R_n . \quad (20)$$

Замінюючи $f = \tan \varphi$, рівняння (20) приводиться до вигляду:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = a_{\pm} (\sin \delta + Z_{\pm}) , \quad (21)$$

$$\text{де } \delta = \omega t, \quad a_{\pm} = A \omega^2 \frac{\cos(\beta \pm \varphi)}{\cos \varphi}, \quad Z_{\pm} = \frac{g}{A \omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \varphi)}{\cos(\beta \pm \varphi)}.$$

В означених рівностях верхні знаки (та індекси Z і a) відносяться до випадку руху частинки в напрямку ($x > 0$), а нижні – до випадку руху у зворотному напрямку ($x < 0$).

Інтегруючи рівняння (21) за методикою [14, 15] для безвідривного двостороннього режиму руху [14] частинки з двома миттєвими зупинками, в роботах [14, 15] визначено швидкість транспортування частинки вздовж деки:

$$\bar{V}_{cp} = A \omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \frac{\varepsilon z_{+}}{\sin \varepsilon}} \left(\left(\frac{2}{\pi} f \tan \varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right), \quad (22)$$

$$\text{де } \varepsilon = \pi K / (K - 1), \quad K = z_{-} / z_{+} .$$

Час перебування частинки (шару зерна) на решітній деці: $\tau = L / V_{cp}$ (де L – довжина деки). Ця величина має бути більшою за час, коли «важка» частинка з висоти шару h дійде до деки.

Аналіз отриманих результатів показує, що використання пульсуючого повітряного потоку зі змінною швидкістю дозволяє суттєво збільшити величину розщеплення траєкторій руху частинок і відповідно ефективність попереднього поділу зернового матеріалу, тобто перед подачею в повітряний канал; координати «важкої» та «легкої» частинок під час сходження з поверхні лотка матимуть різні значення, що унеможливило їхнє концентрування під час входження в повітряний потік. Порівнюючи із сучасними сепараторами, які використовують горизонтальні, похилі та вертикальні пневмоканали, ефективність поділу зернового матеріалу збільшується на 40...48 %.

Висновки. Результати проведених досліджень показали, що швидкість занурення частинок є основним наслідком розпушування шару та перерозподілу частинок різних розмірів та маси за висотою.

Отримані аналітичні та напівемпіричні залежності дозволяють встановити якісний зв'язок швидкості занурення від кінематичного та аеродинамічного режимів і кількісно оцінити вплив частоти коливання поверхні та параметрів імпульсного повітряного потоку на швидкість переміщення частинок.

Швидкість занурення частинок, тобто інтенсивність розшарування, збільшується при збільшенні частоти коливань і подачі повітря в шар зерна; при збільшенні частоти коливання збільшується швидкість пересування шару зерна вздовж поверхні, а збільшення подачі повітря зменшує швидкість пересування. Таким чином реалізація оптимального режиму поділу зернового матеріалу може бути здійснена одночасною зміною частоти коливань та подачею повітря. Тобто необхідно застосовувати двухконтурну систему автоматичного керування процесом поділу.

Список літератури

1. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Т. 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора : монографія / В. М. Сало та ін. Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. 108 с.
2. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) / Б. І. Котов та ін. Ніжин : Вид-во Лисенко М. М., 2017. 552 с.
3. Котов Б., Степаненко С. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів. Київ : ЦП Компринт, 2023. 427 с.
4. Математичне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора / С. П. Степаненко та ін. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-3-3>
5. Котов Б. І. Вібропневматичне розділення насінневих сумішей. *Вісник аграрної науки*. 2005. № 5. С. 55–58.
6. Петренко Н. Н., Марченко І. В., Марченко К. Н. О возможности использования пульсирующего воздушного потока для воздушно-решетной очистки зернового вороха. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2002. С. 117–121.
7. Петренко Н. Н., Марченко І. В., Марченко К. Н. Анализ процесса сепарации зерна на решете в среде пульсирующего воздушного потока. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2003. Вип. 33. С. 141–149.
8. Котов Б. І. Ідентифікація параметрів сипкого середовища у віброзрідженому стані за експериментальними даними. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету*. Київ, 2003. С. 161–163.
9. Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною : дис. ... канд. техн. наук. Кіровоград, 2005. 170 с.
10. Петренко М. М., Богатирьов Д. В. Теоретичні дослідження пневмоімпульсної сепарації за густиною. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2002. Вип. 32. С. 140–146.
11. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Глеваха, 2008. 20 с.
12. Степаненко С. П., Котов Б. І., Попадюк І. С. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одновірного переміщення зернового потоку. *Механізація та електрифікація сільськогосподарства*. 2021. № 14. С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>
13. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насінневих матеріалів за густиною насіння : дис. ... д-ра техн. наук. Кропивницький, 2023. 50 с.
14. Степаненко С. П., Волик Д. А. Математичне моделювання та результати експериментальних досліджень процесу вібропневмоімпульсного поділу насіння за густиною. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 138–148. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148>
15. Волик Д., Попадюк І., Степаненко С. Аналіз конструкцій та перспективи розвитку технічних засобів для розділення насіння за густиною. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва*. 2023. Т. 2, № 116. С. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-11>
16. Котов Б. І., Степаненко С. П. Механіко-математична модель руху твердої частинки у віброзрідженому шарі зерна. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2004. № 15. С. 433–437.
17. Котов Б. І., Степаненко С. П. Дослідження впливу пульсуючого повітряного потоку на переміщення у віброзрідженому шарі зерносомистого вороху. *Механізація та автоматизація сільськогосподарства*. 2016. Т. 4, № 103. С. 38–46.

References

1. Salo, V. M., et al. (2014). *Development of a new design of a pneumatic-sieve grain cleaning machine. Vol. 1. Substantiation of the parameters of the conveyor-separator: Monograph*. Kirovohrad: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., et al. (2017). *Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling)*. Nizhyn: Lysenko M. M. Publishing [in Ukrainian].
3. Kotov, B., & Stepanenko, S. (2023). *Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials*. Kyiv: CP Komprint [in Ukrainian].

4. Stepanenko, S. P., et al. (2023). *Mathematical modeling of the process of grain material movement on the surface of a non-failing sieve of a vibropneumo-impulse separator. Vibrations in Engineering and Technology*, 3(110), 22–34. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-3-3> [in Ukrainian].
5. Kotov, B. I. (2005). *Vibropneumatic separation of seed mixtures. Bulletin of Agricultural Science*, (5), 55–58 [in Ukrainian].
6. Petrenko, N. N., Marchenko, I. V., & Marchenko, K. N. (2002). *On the possibility of using a pulsating air flow for air-sieve cleaning of grain heap. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, 117–121 [in Ukrainian].
7. Petrenko, N. N., Marchenko, I. V., & Marchenko, K. N. (2003). *Analysis of the grain separation process on a sieve in a pulsating air flow environment. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (33), 141–149 [in Ukrainian].
8. Kotov, B. I. (2003). *Identification of parameters of a bulk medium in a vibrofluidized state based on experimental data. Collection of Scientific Papers of the National Agrarian University*, 161–163 [in Ukrainian].
9. Bohatyriov, D. V. (2005). *Substantiation of parameters of a pneumo-impulse machine for seed separation by density* (Candidate's thesis). Kirovohrad [in Ukrainian].
10. Petrenko, M. M., & Bohatyriov, D. V. (2002). *Theoretical studies of pneumo-impulse separation by density. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (32), 140–146 [in Ukrainian].
11. Stepanenko, S. P. (2008). *Improving the efficiency of vibropneumatic grain separators* (Extended abstract of candidate's thesis). Hlevakha [in Ukrainian].
12. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Popadiuk, I. S. (2021). *Study of the process of pneumatic-vibrational grain separation by density during one-dimensional movement of the grain flow. Mechanization and Electrification of Agriculture*, (14), 77–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8> [in Ukrainian].
13. Bredykhin, V. V. (2023). *Scientific foundations of vibropneumatic processes of seed material separation by seed density* (Doctoral thesis). Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
14. Stepanenko, S. P., & Volyk, D. A. (2023). *Mathematical modeling and experimental studies of the process of vibropneumo-impulse seed separation by density. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (53), 138–148. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148> [in Ukrainian].
15. Volyk, D., Popadiuk, I., & Stepanenko, S. (2023). *Analysis of designs and prospects for the development of technical means for seed separation by density. Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production*, 2(116), 100–110. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-11> [in Ukrainian].
16. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2004). *Mechanical-mathematical model of solid particle movement in a vibrofluidized grain layer. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (15), 433–437 [in Ukrainian].
17. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2016). *Study of the influence of a pulsating air flow on movement in a vibrofluidized layer of grain-straw heap. Mechanization and Automation of Agriculture*, 4(103), 38–46 [in Ukrainian].

Borys Kotov¹, Valentyn Myronenko², Serhii Pohorylyi³, Prof., DSc., Volodymyr Hryshchenko³, Yurii Pantsyr¹, Assoc. Prof., PhD

¹Podilskyi State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

²Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production of the NAAS of Ukraine, Hlevakha, Ukraine

³National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Analysis of Vibro-Pneumatic Separation Processes of Grain Materials in the Context of Control Objectives

The aim of the study is to determine the influence of kinematic and aerodynamic parameters on the movement of particles in a vibro-pneumatically fluidized layer and along an oscillating supporting surface.

This work addresses the enhancement of separation efficiency of grain materials in vibro-pneumatic separators by employing pulsating airflow and implementing a dual-loop automated control system for regulating separation parameters. It has been established that particle motion and stratification within the grain layer exhibit a probabilistic and statistical nature, which complicates the maintenance of stable and efficient operating modes in conventional screen-air cleaning systems. A regulation approach is proposed, involving coordinated variation of oscillation frequency of the working surface and airflow parameters, which enables intensification of stratification in the grain mass and improves separation accuracy based on aerodynamic properties and specific weight.

The analysis of experimental results demonstrates that the application of pulsating airflow significantly increases the divergence of particle trajectories for lighter and heavier fractions, thereby reducing their recombination prior to entering the pneumatic channel. This approach results in a 40–48% improvement in the efficiency of preliminary grain material separation compared to conventional systems utilizing horizontal, inclined, or vertical pneumatic ducts. Theoretical investigations substantiate the effect of kinematic and aerodynamic regimes on the particle settling velocity, which is a critical parameter for effective stratification. It is shown that increasing the oscillation frequency enhances the transport velocity of the grain layer along the supporting surface, while increased airflow rate has an inverse effect. This mutual interaction underlines the necessity of employing a dual-loop control system to optimize the separation process.

The research findings can be utilized in the design of new or modernization of existing vibro-pneumatic separators, aiming to improve throughput, final product quality, and energy efficiency in grain cleaning operations.

mathematical modeling, vibrofluidic layer, algorithm, grain, semi-empirical dependences

Одержано (Received) 02.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 656.13

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.217-226](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.217-226)

С. І. Криштопа, проф., д-р техн. наук, А. І. Сем'янчук, А. І. Добуш,
Д. В. Копильців, Р. М. Матвієнко, І. М. Солярчук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: auto.ifntung@ukr.net*

Дослідження потенціалу рекуперації енергії відпрацьованих газів двигунів технологічного транспорту

У статті досліджується питання моделювання та підвищення паливної ефективності силових приводів, що застосовуються на великокубатурних дизельних двигунах в нафтогазовій галузі. Як перспективний напрям модернізації зазначених дизельних двигунів запропоновано використання надкритичних циклів двоокису вуглецю ($s\text{CO}_2$). Проведено аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій, присвячених тематиці моделювання силових приводів, а також виявлено ряд невирішених проблем, що стосуються практичного впровадження технології $s\text{CO}_2$ у нафтогазовій промисловості. З цієї причини у статті розглянуто потенціал застосування надкритичного двоокису вуглецю ($s\text{CO}_2$), органічного циклу Ренкіна (ORC) і термоелектричних генераторних систем (ТЕГ) для рекуперації тепла відпрацьованих газів (WHR) технологічного транспорту нафтогазової галузі. Результати моделювання свідчать, що системи $s\text{CO}_2$ мають найвищий рівень енергетичного відновлення з вихлопних газів, перевершуючи ORC. Зокрема, система $s\text{CO}_2$ змогла відновити 19,5 кВт у режимі максимальної ефективної потужності та 10,1 кВт у режимі максимального крутного моменту, тоді як система ORC - 14,7 кВт і 7,9 кВт відповідно. У режимі низької ефективної потужності $s\text{CO}_2$ забезпечила 4,2 кВт, тоді як ORC - 3,3 кВт. При цьому система ТЕГ продемонструвала значно нижчі показники: 533 Вт при максимальній ефективній потужності гальмування, 126 Вт при максимальному крутному моменті та лише 7 Вт у режимі низьких потужності й моменту, що пояснюється її меншою ефективністю порівняно з $s\text{CO}_2$ і ORC. На основі отриманих результатів зроблено висновок, що технології $s\text{CO}_2$ та ORC мають найбільший потенціал для підвищення ефективності вихлопних систем WHR. Окремо відзначено перспективність застосування надкритичних циклів двоокису вуглецю для покращення економічних характеристик силових приводів у нафтогазовій промисловості.

транспорт; двигун; моделювання силових приводів; утилізація відпрацьованого тепла; надкритичний вуглекислий газ.

Постановка проблеми. На протязі багатьох десятиліть дизельні двигуни активно застосовуються в нафтогазовому технологічному транспорті, бурових установках та різноманітних агрегатах нафтогазової галузі. Одним із ключових завдань для фахівців цієї сфери є зниження витрат палива та зменшення токсичності відпрацьованих газів. Важливо зазначити, що 60-70% паливної енергії втрачається через вихлопну систему та систему охолодження [1]. Системи рекуперації відпрацьованого тепла здатні частково компенсувати ці втрати, перетворюючи частину втраченого тепла в електроенергію. Ця енергія може використовуватися для зниження навантаження на генератор транспортного засобу, а також для живлення паливного, оливного, водяного насосів та інших допоміжних приводів двигуна, що сприяє зменшенню витрати палива.

Існує три багатообіцяючі системи, які зараз досліджуються в промисловості для використання в системах рекуперації відпрацьованого тепла двигунів внутрішнього згорання [2]. Це термоелектричні генератори (ТЕГ), системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) і системи на основі надкритичного діоксиду вуглецю ($s\text{CO}_2$) [3]. Ці системи можна використовувати не лише для рекуперації тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання, але й у багатьох інших галузях, таких як виробництво електроенергії на вкопному паливі або суднова енергетика [4]. Зазначені системи були

спеціально обрані, оскільки вони перебувають у найвищому стані технологічної готовності, порівняно з іншими новітніми доступними варіантами (наприклад, термоакустичними системами), які знаходяться на початковій та середній стадії дослідження [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. *Надкритичні цикли двоокису вуглецю (sCO_2).* Двоокис вуглецю - це екологічно безпечна природна робоча речовина, яка є недорогою, негорючою, вибухобезпечною та поширена в природі [6]. Крім того, двоокис вуглецю має низький потенціал глобального потепління і не має озоноруйнівного ефекту [7], що є важливими екологічними характеристиками при виборі робочої рідини для термодинамічного циклу виробництва електроенергії. Коли CO_2 наближається до критичної точки, він стає менш податливим до стиснення [8]. Отже, робота компресора може бути суттєво зменшена, що призведе до підвищення ефективності термодинамічного циклу. Ще одна перевага використання циклів sCO_2 полягає в тому, що вони працюють під набагато вищим тиском протягом усього циклу, що призводить до більш високої щільності робочої рідини, що сприяє меншим розмірам обладнання та фізичним слідам, а отже, меншим капітальним витратам [9].

Автори [10] провели дослідження циклів утилізації відпрацьованого тепла sCO_2 для суднових енергетичних систем. Дослідження порівнювало запропоновану систему, яка використовує sCO_2 циклу Брейтона, зі звичайним циклом Брейтона, який уже використовується для цього застосування. Вони виявили, що можна досягти збільшення вихідної потужності приблизно на 18 %, а також збільшення загальної ефективності бортової енергетичної системи, більш ніж на 11 % [11]. Було проведено моделювальне дослідження, щоб перевірити покращення продуктивності системи попереднього нагріву на основі циклу sCO_2 для рекуперації відпрацьованого тепла двигуна. Двигун, який розглядався, був шестирядним дизельним двигуном з турбонаддувом, який є типовим для шасі сучасного вантажного магістрального транспорту і може використовуватись в такій якості для досліджень утилізації відпрацьованого тепла ORC. Результати моделювання показують, що вдосконалена система може краще використовувати теплове навантаження регенерації і, отже, покращити продуктивність системи. Крім того, максимальний чистий вихід енергії двигуна з системою рекуперації на 7,4 % вище, ніж у вихідного двигуна. Завдяки застосуванню вдосконаленої системи попереднього підігріву, потужність двигуна була додатково збільшена на 6,9 % [12]. Варто додати, що подібне дослідження, проведене на тому ж двигуні з подібними системами, але на основі sCO_2 показало, що вихідна потужність двигуна зросла ще на 8,5 %, що вказує на величезний потенціал для практичного застосування [13].

Органічний цикл Ренкіна (ORC). Системи рекуперації відпрацьованого тепла ORC протягом кількох десятиліть ретельно досліджувалися для застосування у великокубатурних дизельних двигунах. У [14] проведено широкий огляд літератури щодо таких досліджень ORC. Авторі виявили, що дизельні двигуни та газові турбіни є найбільш використовуваними джерелами тепла для досліджень WHR.

В [15] провели дослідження дизельного двигуна з турбонаддувом об'ємом 10,3 л і потужністю 316 кВт з використанням системи ORC WHR. Система могла відновити від 2 до 4 кВт на низьких оборотах і від 8 до 16 кВт на високих оборотах [16]. В [17] моделювалась система ORC WHR на двигуні Volvo D-13 об'ємом 13 л і потужністю 367 кВт, використовуючи суміш 80 % води та 20 % етанолу, як робочу рідину. Виявилось, що ККД системи WHR коливається від 9 до 23 % залежно від джерела відпрацьованого тепла. В роботі [18] розглянули продуктивність ORC для дизельних двигунів різних конфігурацій і виявили, що існує потенціал покращення економії

палива до 5 %, шляхом ефективного впровадження систем ORC для рекуперації тепла відпрацьованих газів двигуна.

У [19] було проведено широкий огляд досліджень дизельних двигунів ORC WHR. Він виявив, що реально можна досягти економії палива до 20 %, а також одержати 10–25 % теплової ефективності для одноконтурних систем ORC. Ці висновки були підтверджені авторами роботи [20], які провели аналогічний технічний огляд двигунів із запалюванням від стиснення, використовуючи системи ORC WHR. Вони виявили, що фреон R245fa є найкращою робочою рідиною для цих систем, завдяки хорошим характеристикам як холодоагенту, доступності та низькому економічному та екологічному впливу.

Термоелектричні генератори (ТЕГ). Термоелектричні процеси - це процеси, в результаті яких відбувається безпосереднє перетворення теплової енергії в електричну. Термоелектричні генератори мають великий потенціал для використання в системах рекуперації відпрацьованого тепла на автомобілях, спецтехніці, бурових установках, електростанціях та ін. Вони мають багато переваг, включаючи низькі витрати на обслуговування, нульовий вплив на навколишнє середовище, тиху роботу, компактність і стабільність. Однак залишаються значні технічні проблеми, які досі обмежували прогрес цих систем. До них належать низька ефективність і низька максимальна робоча температура, які продиктовані вибором термоелектричних матеріалів, а також ефекти інтеграції, які виникають через збільшення маси, складності та підвищеного протитиску вихлопу.

В [21] провели експеримент, щоб перевірити продуктивність та WHR ТЕГ продемонстрував, що потужність, вироблена ТЕГ, зростає з навантаженням двигуна та підвищення обертів колінчастого валу. Крім того, в [22] була досягнута максимальна вихідна потужність 119 Вт при 2000 об/хв., а також максимальна ефективність перетворення приблизно 8 %. В роботі [23] провели дослідження, щоб побачити, як розташування ТЕГ впливає на потенціал економії палива в автомобілях. Дослідження показало, що якщо розмістити ТЕГ ближче до випускного колектора, потенціал економії палива може збільшитися на 20 %.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є оцінка потенціалу рекуперації електроенергії за допомогою систем ORC, sCO₂ та TEG у системах утилізації тепла вихлопних газів дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) нафтогазового технологічного транспорту. Це дозволить визначити їхню ефективність і придатність для використання в системах рекуперації відпрацьованого тепла.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- створення моделі дизельного двигуна у програмному середовищі GT-SUITE;
- розробка моделей систем TEG, ORC і sCO₂ у GT-SUITE та їх симуляція у взаємодії з моделлю дизельного двигуна;
- аналіз отриманих результатів шляхом порівняння з даними наукової літератури для визначення найбільш ефективної технології рекуперації тепла вихлопних газів ДВЗ нафтогазового технологічного транспорту.

Виклад основного матеріалу. *Методологія моделювання.* Дослідження виконано за допомогою програмного комплексу GT-SUITE — спеціалізованого програмного забезпечення для симуляції двигунів, трансмісій та транспортних засобів. Цей комплекс є потужним інструментом для моделювання різних систем двигунів і широко використовується провідними виробниками у сфері автомобілебудування. GT-SUITE включає вбудовані 3D CAD-інструменти, засоби оптимізації та можливості навчання нейронних мереж. Крім того, воно інтегрується з MATLAB і Simulink, що

дозволяє проводити глибший аналіз систем керування.

Важливою частиною моделювання в GT-SUITE є калібрування різних компонентів системи. У цьому проекті першим кроком було створення автономних калібрувальних моделей для теплообмінників, компресорів, насосів і турбін, які використовуються в моделях дизельного двигуна НГТТ та WHR. Ці моделі порівнювалися з довідковими даними випробувань, наданими виробниками дизельних двигунів, а також іншими даними калібрування, знайденими в літературі. Коли компоненти були відкалібровані, а якість результатів порівняно з даними тестування стала прийнятною, було розпочато моделювання для цього проекту.

Моделювання дизельних двигунів нафтогазової галузі. Для цього проекту використовувався 6-циліндровий 4-тактний дизельний двигун робочим об'ємом 12,0 л зі ступенем стиснення 17:1. Це типові двигуни, які зараз використовуються на різних моделях нафтогазового технологічного транспорту ПАТ «Укрнафта».

Модель теплообміну в циліндрі, яка використовується в цьому дослідженні, є моделлю WoschniGT. У цій моделі використовується формула, яка точно імітує класичну кореляцію Вошні без завихрення. Однак різниця полягає в обробці коефіцієнтів тепловіддачі при відкритих клапанах. Модель WoschniGT враховує передачу тепла, збільшену швидкістю припливу через впускні клапани, а також зворотний потік через випускні клапани. Крім того, використовується модель згоряння – це безпосереднє вприскування (DI), коли паливо впорскується безпосередньо в циліндр. У цій моделі ефективна потужність двигуна регулюється кількістю палива, що впорскується в циліндри. Подача палива обмежена в контролері співвідношенням повітря та палива. Турбонагнітачу встановлювався час 1 секунда, щоб досягти постійної швидкості турбіни після зміни частоти обертів колінчастого вала двигуна. Після визначення необхідних параметрів користувач може ввести відповідні вхідні дані, необхідні для моделювання. У цьому проекті вибрані значення наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Обрані параметри для дизельного двигуна НГТТ в GT-SUITE

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6	Режим 7	Режим 8
Потужність двигуна (кВт)	240	270	295	305	270	225	155	90
Маса палива, що впорскується в циліндри (мг)	255	240	225	210	195	180	165	150
Частота обертання колінчастого вала двигуна (об/хв)	3000	2400	2000	1800	1600	1400	1200	1000
Обороти турбокомпресора (об/хв)	90 000	86 000	80 000	82 000	77 000	69 000	60 000	52 000

Джерело: розроблено авторами

Моделювання системи ORC. У цьому дослідженні буде прийнято підхід дослідження непрямої інтеграції. Тут моделюється двигун окремо від моделі WHR. По-перше моделюється модель дизельного двигуна. Після цього відповідні дані вставляються в окрему модель WHR і моделюються, щоб отримати відновлену системою потужність. Ця модель містить типові компоненти системи ORC, але має додаткову перевагу використання рекуператора, який допомагає ще більше підвищити ефективність системи. Для цієї системи робочою рідиною було обрано фреон R245fa. Вибір робочої рідини ґрунтувався на практичності (наявність фреону R245fa та вартість).

Моделювання системи sCO₂. На рис. 1 показана модель системи sCO₂, створена в

GT-SUITE. Конструкція системи базувалася на рекуперованому замкнутому циклі Брайтона. Ця система має додаткову перевагу підвищення загальної ефективності завдяки використанню рекуператора. Робочим тілом для цієї системи є вуглекислий газ (CO_2) у надкритичному стані. У цьому стані температура і тиск CO_2 вищі за критичну точку, тому рідку та парову фази неможливо розрізнити. Це відбувається, коли температура перевищує 31°C і тиск перевищує 83,8 бар.

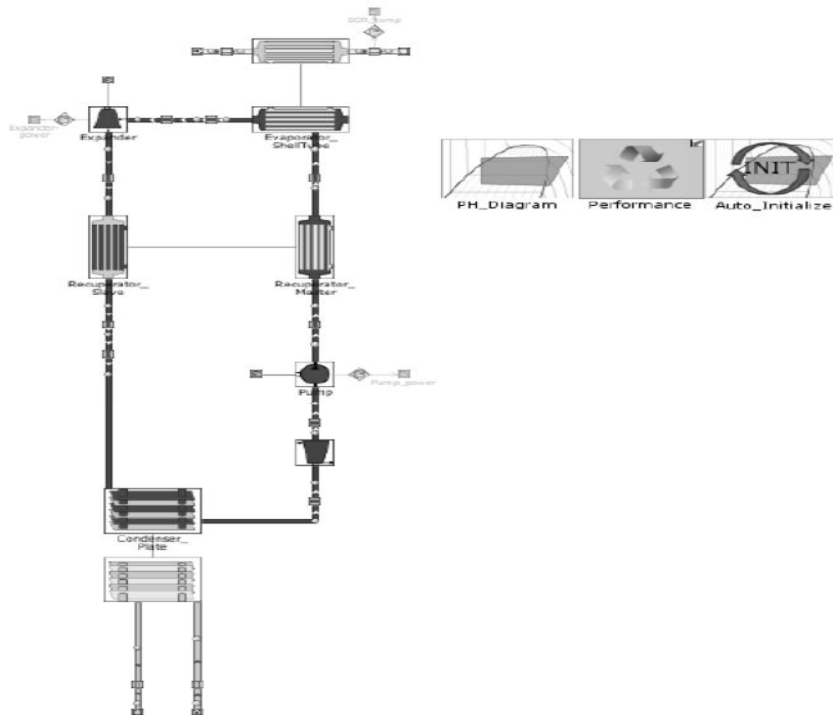


Рисунок 1 – Схема моделі системи sCO_2 у GT-SUITE

Джерело: розроблено авторами

Після моделювання системи можна визначити розділ налаштування корпусу. Остаточні параметри налаштування корпусу можна побачити в табл. 2 нижче. Важливим параметром є початкова температура холодоагенту. Її встановлено на 31°C , щоб забезпечити надкритичний стан CO_2 у всій системі.

Моделювання системи TEG. Останньою системою, яка тестується в цьому дослідженні, є система TEG. Термоелектричні модулі (ТЕМ), які входять в систему TEG, зображені на рис. 2.

Кожна труба моделюється як «плоска пластина», яку можна знайти в типовому пластинчастому теплообміннику. Труби моделюються за допомогою теплових трубок, з'єднаних із масами, які представляють стінки труб і ребра для внутрішньої труби. Крім того, шаблон ТЕМ, який використовується в моделі, враховує всі три термоелектричні ефекти (Зеебека, Пельтьє і Томсона), щоб генерувати електричний потенціал у відповідності з різницею температур на ньому. Той самий процес повторюється для всіх 10 ТЕМ, щоб отримати повну модель. Для аналізу потужності, виробленої всією системою TEG, була створена підмодель, яка підсумовує всі вихідні потужності від кожного ТЕМ. Параметри налаштування TEG наведені в табл. 2.

Результати та їх обговорення. Після моделювання дизельного двигуна та систем утилізації відпрацьованого тепла були проаналізовані відповідні результати моделювання дизельного двигуна.

На рис. 3 можна побачити гальмівний момент, створюваний двигуном у тому ж діапазоні обертів. Ми бачимо, що максимальний гальмівний момент становить

приблизно 1540 Н·м при 1400 об/хв. Знову ж таки, цей показник у цьому діапазоні потужності є репрезентативним для поточних серійних потужних дизельних двигунів, що ще більше підвищує довіру до моделі.

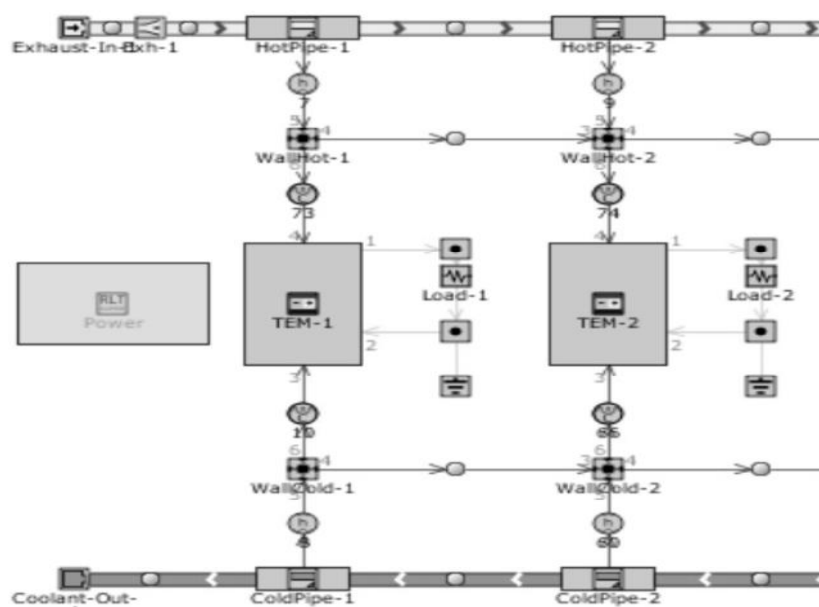


Рисунок 2 – Схема системи ТЕГ

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Остаточні обрані параметри для моделі ТЕГ у GT-SUITE

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Масова витрата теплоносія (кг/с)	0,1	0,4	0,8
Масова витрата відпрацьованих газів (кг/с)	0,13693	0,32345	0,47707
Тиск охолоджуючої рідини на виході (МПа)	0,1	0,1	0,1
Тиск вихлопу на виході (МПа)	0,1009656	0,10482228	0,10881422
Температура теплоносія на вході (°C)	25	25	25
Температура вихлопу на вході (K)	655,5935	711,7872	783,91376

Джерело: розроблено авторами

Після отримання кривих потужності та крутного моменту від двигуна важливо вибрати кілька робочих режимів, щоб вивчити, яку потужність системи WHR можна відновити під час типових сценаріїв експлуатації двигуна НГТТ. У цьому проекті було обрано три режими роботи:

Режим 1. Точка низької потужності та крутного моменту (потужність 90 кВт) — як іншу точку інтересу було обрано 1000 об/хв;

Режим 2. Точка максимального крутного моменту (потужність 225 кВт) — вироблено 1540 Н·м при 1400 об/хв;

Режим 3. Точка максимальної потужності (потужність 305 кВт) — модель виробляє 305 кВт при 1800 об/хв.

На рис. 4 зображено масову швидкість потоку вихлопних газів у вибраних точках, що представляють інтерес (1000 об/хв, 1400 об/хв та 1800 об/хв). Це разом зі значеннями температури вихлопу в дослідних точках на рис. 5 було введено в моделі WHR, як вхідні значення вихлопу. Отримавши ці значення вихлопів, було використано непрямий підхід, як обговорювалося в розділі «Методологія» звіту.

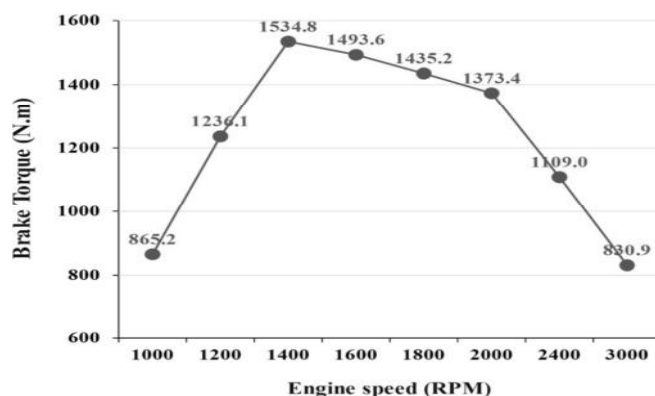


Рисунок 3 – Крива залежності крутного моменту двигуна (Н·м) від частоти обертання колінчастого вала (об/хв)

Джерело: розроблено авторами

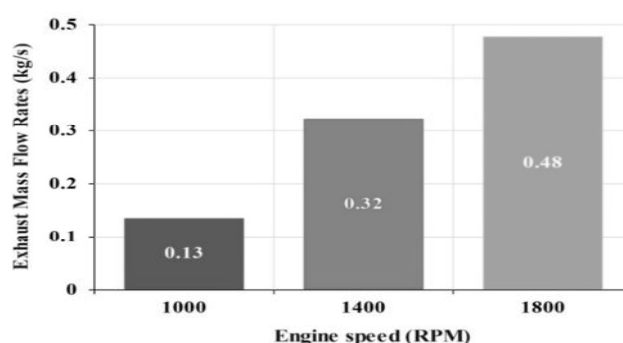


Рисунок 4 – Масові витрати вихлопних газів для вибраних точок інтересу

Джерело: розроблено авторами

Загалом, з результатів усіх трьох систем WHR, на рис. 6 можна побачити, що найімовірнішими системами, які будуть успішними для застосування утилізації відпрацьованого тепла вихлопних газів для важких дизельних двигунів, є системи ORC і sCO_2 . Ці дві системи мають значно вищу ефективність, ніж ТЕГ, і тому рекуперують набагато більше енергії з вихлопних газів. Крім того, системи sCO_2 мають додаткову перевагу, оскільки є більш компактними завдяки вищому робочому тиску системи. Однак головними проблемами, з якими стикаються як системи ORC, так і sCO_2 , є розробка високоефективних турбін, які будуть надійними при підвищених тисках і температурах. Якщо ці проблеми вдасться подолати, існує значна можливість для масового застосування цих систем для додатків WHR.

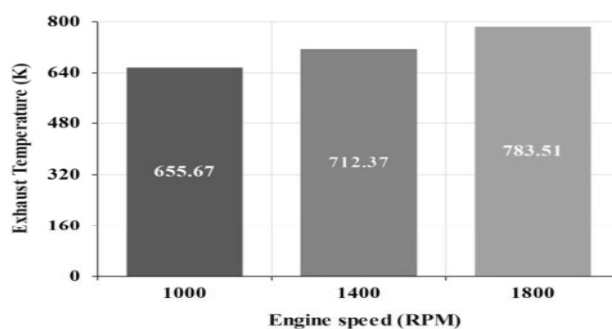


Рисунок 5 – Температура вихлопу для вибраних точок

Джерело: розроблено авторами

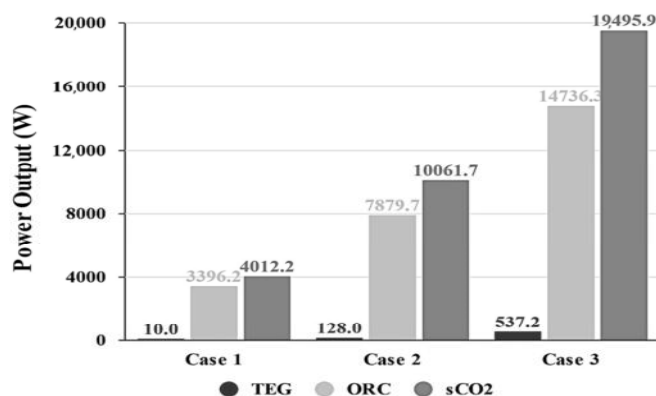


Рисунок 6 – Порівняння трьох систем WHR

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Загалом, це єдине дослідження, яке розглядає всі три основні системи рекуперації тепла для мобільного застосування. Попередні дослідження, які обговорювалися в літературі, не стосуються впровадження sCO₂. Таким чином, цінність цього дослідження полягає в одночасній оцінці цих трьох основних варіантів утилізації відпрацьованого тепла в одному дослідженні та проведенні на основі загальної порівняльної бази. Було проведено дослідження потенціалу систем ORC, sCO₂ і TEG для використання у дизельних двигунах технологічного транспорту можливостей утилізації вихлопних газів. На цих системах було виконано низку симуляцій та експериментальних досліджень для різноманітних застосувань; однак вони ще не були прийняті в масовому масштабі на транспорті.

Ґрунтуючись на одержаних результатах, можна з упевненістю підтвердити життєздатність систем sCO₂ і ORC як найбільш ймовірних систем, які будуть прийняті для застосування в дизельних двигунах WHR. Системи sCO₂ мають найвищу ефективність з трьох систем WHR, а також мають перевагу компактності завдяки вищому робочому тиску. Крім того, вартість кВт електроенергії, виробленої системами sCO₂, також значно нижча, ніж у системах ORC і TEG. Звичайно, застосовність таких систем все ще є предметом дебатов у контексті електрифікації транспорту, але дедалі більше впровадження альтернативних видів палива та водневих варіантів означає, що такі системи можна розглядати з новою силою. Очевидно, що ще потрібно подолати деякі проблеми щодо дизайну компонентів і доступності систем для масового виробництва. Однак, якщо це буде досягнуто, у найближчій перспективі потенціал цих систем можна використовувати. Енергія, відновлена цими системами, може бути використана для живлення допоміжних компонентів, таких як кондиціонер або освітлення, таким чином зменшуючи споживання палива автомобіля. Зважаючи на зростаючий тиск на виробників автомобілів щодо зменшення викидів від своїх транспортних засобів, ці системи WHR можуть виявитися привабливою перспективою. Під час промислового використання системи sCO₂ та ORC вимагатимуть підвищених вимог до обслуговування порівняно з системами TEG; у контексті транспортування ці вимоги, ймовірно, будуть мінімальними за задумом, але їх оцінка фактично виходить за межі цього дослідження.

Список літератури

1. Mahmoudzadeh Andwari A., Pesyridis A., Esfahanian V., Salavati-Zadeh A., Hajjalimohammadi A. Modelling and evaluation of waste heat recovery systems in the case of a heavy-duty diesel engine. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1397.
2. Moradi J., Gharehghani A., Mirsalim M. Numerical investigation on the effect of oxygen in combustion characteristics and to extend low load operating range of a natural-gas HCCI engine. *Applied Energy*. 2020. Vol. 276. P. 115516.
3. Song J., Ren X.-D., Gu C.-W. Investigation of engine waste heat recovery using supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle system. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. New York : American Society of Mechanical Engineers, 2018. Vol. 51180. P. V009T38A014.
4. Mehranfar S., Gharehghani A., Azizi A., Mahmoudzadeh A., Pesyridis A., Jouhara H. Comparative assessment

- of innovative methods to improve solar chimney power plant efficiency. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 49. P. 101807.
5. Moradi J., Gharehghani A., Mirsalim M. Numerical comparison of combustion characteristics and cost between hydrogen, oxygen and their combinations addition on natural gas fueled HCCI engine. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 222. P. 113254.
 6. Gharehghani A., Kakoei A., Andwari A. M., Megaritis T., Pesyridis A. Numerical investigation of an RCCI engine fueled with natural gas/dimethyl-ether in various injection strategies. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1638.
 7. Gharehghani A., Mirsalim S. M., Jazayeri S. A. Numerical and experimental investigation of combustion and knock in a dual fuel gas/diesel compression ignition engine. *Journal of Combustion*. 2012. Vol. 12. P. 504590.
 8. Eichler K., Jeihouni Y., Ritterskamp C. Fuel economy benefits for commercial diesel engines with waste heat recovery. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2015. Vol. 8. P. 491–505.
 9. Siddiqui M. E. Thermodynamic performance improvement of recompression Brayton cycle utilizing CO₂–C₇H₈ binary mixture. *Mechanics*. 2021. Vol. 27. P. 259–264.
 10. Wieland C., Schiffelechner C., Dawo F., Astolfi M. The organic Rankine cycle power systems market: recent developments and future perspectives. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 224. P. 119980.
 11. Marchionni M., Bianchi G., Tsamos K. M., Tassou S. A. Techno-economic comparison of different cycle architectures for high temperature waste heat to power conversion systems using CO₂ in supercritical phase. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 123. P. 305–312.
 12. Mahmoudzadeh A., Pesiridis A., Karvountzis-Kontakiotis A., Esfahanian V. Hybrid electric vehicle performance with organic Rankine cycle waste heat recovery system. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. P. 437.
 13. Siddiqui M., Almatrafi E., Bamasag A., Saeed U. Adoption of CO₂-based binary mixture to operate transcritical Rankine cycle in warm regions. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 199. P. 1372–1380.
 14. Varshil P., Deshmuk D. A comprehensive review of waste heat recovery from a diesel engine using organic Rankine cycle. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 3951–3970.
 15. Hoang A. Waste heat recovery from diesel engines based on organic Rankine cycle. *Applied Energy*. 2018. Vol. 231. P. 138–166.
 16. Mahmoudzadeh A., Pesiridis A., Esfahanian V., Salavati-Zadeh A., Karvountzis-Kontakiotis A., Muralidharan V. A comparative study of the effect of turbocompounding and ORC waste heat recovery systems on the performance of a turbocharged heavy-duty diesel engine. *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1087.
 17. Kim T., Negash A., Cho G. Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 124. P. 280–286.
 18. Chintala V., Kumar S., Pandey J. A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 493–509.
 19. Lan S., Yang Z., Stobart R., Chen R. Prediction of the fuel economy potential for a skutterudite thermoelectric generator in light-duty vehicle applications. *Applied Energy*. 2018. Vol. 231. P. 68–79.
 20. Guo J., Li M., He Y., Jiang T., Ma T., Xu J., Cao F. A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 258. P. 115437.
 21. Manjunath K., Sharma O., Tyagi S., Kaushik S. Thermodynamic analysis of a supercritical/transcritical CO₂ based waste heat recovery cycle for shipboard power and cooling applications. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 155. P. 262–275.
 22. Arunachalam P., Shen M., Tuner M., Tunesta P., Thern M. Waste heat recovery from multiple heat sources in a HD truck diesel engine using a Rankine cycle. A theoretical evaluation. *SAE Technical Paper*. Warrendale, PA : SAE International, 2012. 0148-7191.
 23. Andwari A., Pesyridis A., Esfahanian V., Muhamad Said M. Combustion and emission enhancement of a spark ignition two-stroke cycle engine utilizing internal and external exhaust gas recirculation approach at low-load operation. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 609.

References

1. Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesyridis, A., Esfahanian, V., Salavati-Zadeh, A., & Hajjalimohammadi, A. (2019). Modelling and evaluation of waste heat recovery systems in the case of a heavy-duty diesel engine. *Energies*, 12, 1397.
2. Moradi, J., Gharehghani, A., & Mirsalim, M. (2020). Numerical investigation on the effect of oxygen in combustion characteristics and to extend low load operating range of a natural-gas HCCI engine. *Applied Energy*, 276, 115516.
3. Song, J., Ren, X.-D., & Gu, C.-W. (2018). Investigation of engine waste heat recovery using supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle system. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 51180, p. V009T38A014). New York: American Society of Mechanical Engineers.
4. Mehranfar, S., Gharehghani, A., Azizi, A., Mahmoudzadeh, A., Pesyridis, A., & Jouhara, H. (2022). Comparative assessment of innovative methods to improve solar chimney power plant efficiency. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101807.
5. Moradi, J., Gharehghani, A., & Mirsalim, M. (2020). Numerical comparison of combustion characteristics and cost between hydrogen, oxygen and their combinations addition on natural gas fueled HCCI engine. *Energy Conversion and Management*, 222, 113254.
6. Gharehghani, A., Kakoei, A., Andwari, A. M., Megaritis, T., & Pesyridis, A. (2021). Numerical investigation of an RCCI engine fueled with natural gas/dimethyl-ether in various injection strategies. *Energies*, 14, 1638.
7. Gharehghani, A., Mirsalim, S. M., & Jazayeri, S. A. (2012). Numerical and experimental investigation of combustion and knock in a dual fuel gas/diesel compression ignition engine. *Journal of Combustion*, 2012, 504590.
8. Eichler, K., Jeihouni, Y., & Ritterskamp, C. (2015). Fuel economy benefits for commercial diesel engines with

- waste heat recovery. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 8, 491–505.
9. Siddiqui, M. E. (2021). Thermodynamic performance improvement of recompression Brayton cycle utilizing CO₂-C₇H₈ binary mixture. *Mechanics*, 27, 259–264.
 10. Wieland, C., Schiffelechner, C., Dawo, F., & Astolfi, M. (2023). The organic Rankine cycle power systems market: Recent developments and future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 224, 119980.
 11. Marchionni, M., Bianchi, G., Tsamos, K. M., & Tassou, S. A. (2017). Techno-economic comparison of different cycle architectures for high temperature waste heat to power conversion systems using CO₂ in supercritical phase. *Energy Procedia*, 123, 305–312.
 12. Mahmoudzadeh, A., Pesiridis, A., Karvountzis-Kontakiotis, A., & Esfahanian, V. (2017). Hybrid electric vehicle performance with organic Rankine cycle waste heat recovery system. *Applied Sciences*, 7, 437.
 13. Siddiqui, M., Almatrafi, E., Bamasag, A., & Saeed, U. (2022). Adoption of CO₂-based binary mixture to operate transcritical Rankine cycle in warm regions. *Renewable Energy*, 199, 1372–1380.
 14. Varshil, P., & Deshmuk, D. (2021). A comprehensive review of waste heat recovery from a diesel engine using organic Rankine cycle. *Energy Reports*, 7, 3951–3970.
 15. Hoang, A. (2018). Waste heat recovery from diesel engines based on organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 231, 138–166.
 16. Mahmoudzadeh, A., Pesiridis, A., Esfahanian, V., Salavati-Zadeh, A., Karvountzis-Kontakiotis, A., & Muralidharan, V. (2017). A comparative study of the effect of turbocompounding and ORC waste heat recovery systems on the performance of a turbocharged heavy-duty diesel engine. *Energies*, 10, 1087.
 17. Kim, T., Negash, A., & Cho, G. (2016). Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 124, 280–286.
 18. Chintala, V., Kumar, S., & Pandey, J. (2018). A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 493–509.
 19. Lan, S., Yang, Z., Stobart, R., & Chen, R. (2018). Prediction of the fuel economy potential for a skutterudite thermoelectric generator in light-duty vehicle applications. *Applied Energy*, 231, 68–79.
 20. Guo, J., Li, M., He, Y., Jiang, T., Ma, T., Xu, J., & Cao, F. (2022). A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: Technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Conversion and Management*, 258, 115437.
 21. Manjunath, K., Sharma, O., Tyagi, S., & Kaushik, S. (2018). Thermodynamic analysis of a supercritical/transcritical CO₂ based waste heat recovery cycle for shipboard power and cooling applications. *Energy Conversion and Management*, 155, 262–275.
 22. Arunachalam, P., Shen, M., Tuner, M., Tunesta, P., & Thern, M. (2012). Waste heat recovery from multiple heat sources in a HD truck diesel engine using a Rankine cycle. A theoretical evaluation. *SAE Technical Paper*. Warrendale, PA: SAE International.
 23. Andwari, A., Pesiridis, A., Esfahanian, V., & Muhamad Said, M. (2019). Combustion and emission enhancement of a spark ignition two-stroke cycle engine utilizing internal and external exhaust gas recirculation approach at low-load operation. *Energies*, 12, 609.

Sviatoslav Kryshchtopa, Prof., DSc., **Andriy Semianchuk**, **Andriy Dobush**, **Dmytro Kopyltsiv**,
Roman Matviienko, **Ivan Solyarchuk**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Research into the Potential for Energy Recovery from Exhaust Gases from Technological Transport Engines

The article investigates the issue of modeling and increasing the fuel efficiency of power drives used on large-capacity diesel engines in the oil and gas industry. The use of supercritical carbon dioxide (sCO₂) cycles is proposed as a promising direction for the modernization of these diesel engines. An analysis of modern scientific research and publications on the topic of power drive modeling is carried out, and a number of unresolved problems related to the practical implementation of sCO₂ technology in the oil and gas industry are also identified. For this reason, the article considers the potential of using supercritical carbon dioxide (sCO₂), the organic Rankine cycle (ORC) and thermoelectric generator systems (TEG) for waste heat recovery (WHR) of technological transport in the oil and gas industry.

The modeling results show that sCO₂ systems have the highest level of energy recovery from exhaust gases, surpassing ORC. In particular, the sCO₂ system was able to recover 19.5 kW in the maximum effective power mode and 10.1 kW in the maximum torque mode, while the ORC system - 14.7 kW and 7.9 kW, respectively. In the low effective power mode, the sCO₂ provided 4.2 kW, while the ORC - 3.3 kW. At the same time, the TEG system demonstrated significantly lower performance: 533 W at maximum effective braking power, 126 W at maximum torque and only 7 W in the low power and torque mode, which is explained by its lower efficiency compared to sCO₂ and ORC.

Based on the results obtained, it was concluded that the sCO₂ and ORC technologies have the greatest potential for increasing the efficiency of WHR exhaust systems. The prospects of using supercritical carbon dioxide cycles to improve the economic characteristics of power drives in the oil and gas industry were separately noted.

transport, engine, powertrain modeling, waste heat recovery, supercritical carbon dioxide

Одержано (Received) 09.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

УДК 629.064:631.372:004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.227-237](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.227-237)**О. О. Матвієнко**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,**А. В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Стан та напрями розвитку архітектури даних для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин підприємств агропромислового виробництва

У статті подано критичний огляд сучасних існуючих наборів даних з сенсорів для інтелектуальної оцінки технічного стану вузлів і механізмів мобільних машин агропромислового виробництва шляхом застосування методів машинного навчання. Показано обмеженість існуючих публічних наборів даних, відсутність уніфікації методики і архітектури збору даних в умовах агропромислового підприємства. Запропоновано концепцію і архітектуру для збору даних з сенсорів на вузлах і механізмах мобільних машин агропромислового виробництва з подальшою обробкою методами машинного навчання для інтелектуальної оцінки технічного стану.

мобільні машини, агропромислове виробництво, інтелектуальна система, технічний сервіс, машинне навчання, прогнозне технічне обслуговування, мультисенсорна діагностика, діагностичні сигнали, виявлення аномалій

Постановка проблеми. Мобільні машини агропромислового виробництва (ММАПВ) працюють у змінних, часто жорстких умовах середовища і навантажувальних режимах, що ускладнює своєчасне виявлення деградації вузлів і планування сервісу. Планові й реактивні підходи технічного обслуговування (ТО) не відображають реального технічного стану та призводять до непередбачуваних відмов і зростання витрат. Потрібен перехід до інтелектуального технічного сервісу, заснованого на інтеграції сенсорних вимірювань і методів машинного навчання для онлайн-діагностики та прогнозного обслуговування [1].

Водночас, попри стрімкий розвиток штучного інтелекту (ШІ) і, зокрема, машинного навчання (МН), у відкритому доступі бракує якісних наборів даних для інтелектуальної оцінки технічного стану вузлів та механізмів машин загалом і ММАПВ зокрема. У роботах в цьому напрямі дані відсутні або недоступні для відтворення. Немає й усталеної архітектури та узгодженої методики збору таких даних у реальних умовах підприємств агропромислового комплексу (АПК), що гальмує стандартизацію та бенчмаркінг рішень в напрямку інтелектуальної оцінки технічного стану ММАПВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У межах предметної області інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин агропромислового виробництва релевантні джерела даних виявилися поодинокими, фрагментарними та гетерогенними за модальністю (вібрація, акустика, електричні сигнали), режимами збирання і якістю супровідних метаданих. На базі класифікації сенсорних сигналів і сценаріїв діагностики [2] здійснено систематичний відбір і стратифікацію наборів даних на три категорії: публічні; одержані авторами та формально доступні «за запитом»; повністю закриті.

У табл. 1 узагальнено відкриті набори даних, релевантні до мобільних машин агропромислового виробництва: зазначено джерело даних, об'єкт контролю (вузли машини), модальність сигналів (вібрація, акустичний сигнал тощо) та короткий опис даних. Посилання на набори даних подано в загальному списку літератури [23-34].

У табл. 2 показано, що низка дослідників працює саме з відкритими публічними наборами даних і звітує результати у наукових публікаціях [3-17]. Для кожного випадку стисло окреслено постановку задачі (класифікація технічних станів, виявлення аномалій, прогнозування залишкового ресурсу), протокол оцінювання та метрики якості, що застосовувалися в роботах (зокрема, для класифікації – точність, F1-міра, ROC-AUC; для регресійних оцінок – MAE, RMSE; для прогнозних оцінок – CRPS). Окремо відзначимо, що жодне з проаналізованих джерел не надало зафіксованого обчислювального середовища (Python / R / MATLAB) у вигляді lock-файлів, контейнерних образів, здатних забезпечити повну відтворюваність заявлених результатів при наявності скриптів відтворення.

Таблиця 1 – Характеристика публічних наявних наборів даних з сенсорів, релевантних з вузлами і механізмами мобільних машин агропромислового виробництва

Коротка назва	Розшифровка абревіатури в назві	Модальність / сфера	Короткий опис (агрорелевантність)
DCASE'20 T2 [23]	Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2020 Task 2	Акустика (звуки машин)	Звуки вентиляторів, насосів, клапанів, конвеєрів — допоміжні вузли у мобільній агротехніці
DCASE'21 T2 [24]	Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 Task 2	Акустика (звуки машин)	Як у DCASE'20, але з доменним зсувом; включає редуктор/слайд-рейл
IMS [25]	Intelligent Maintenance Systems (NASA PCoE/IMS Rexnord) Run-to-Failure	Вібрація (підшипники)	Run-to-failure підшипників валів — типова деградація трансмісій/насосів
CWRU [26]	Case Western Reserve University Bearing Data Center	Вібрація (підшипники)	Штучні дефекти підшипників за різних навантажень (редуктори/вали)
SEU/DDS [27]	Southeast University / Drivetrain Dynamic Simulator	Вібрація (підшипники, редуктор)	Редуктор і підшипники на стенді DDS; умови 20-0 / 30-2 (трансмісії/приводи)
Paderborn/Kat [28]	Paderborn University — Chair of Design and Drive Technology	Вібрація (підшипники; також струм)	Вібрація підшипників у приводі; за потреби канал MCSA
JNU [29]	Jiangnan University Bearing Dataset	Вібрація (підшипники)	Підшипники на різних швидкостях (600–1000 rpm); варіативність режимів
PHM2009 [30]	Prognostics and Health Management 2009 Gearbox Challenge	Вібрація (редуктор)	Редуктор з акселерометрами (аналог коробок/приводів навісного обладнання)
MFPT [31]	Society for Machinery Failure Prevention Technology	Вібрація (підшипники; стенд + польові)	Польові піднабори: масляний насос, проміжний вал, планетарний підшипник
MaFaulDa [32]	Machinery Fault Database (SpectraQuest rig)	Вібрація (роторні вузли)	Дисбаланс, невірні встановлення, дефекти підшипників — типові для валів та редукторів
Purdue Motor [33]	Purdue Motor Testbed Vibration (Abdallah et al., 2023)	Вібрація (електродвигун)	3 осі; piezo 3.2 кГц і MEMS 10 Гц; 100–600 rpm; 3 стани (норма, передвідмова, відмова)
UCI HIL [34]	University of California, Irvine — Hydraulic Systems	Мультисенсор (гідросистема)	Тиски, витрати, температури, потужність; мішені: охолоджувач, клапан, витоки насоса, акумулятор

Джерело: розроблено авторами

Серед проаналізованих робіт трапляються кейси, де автори використовують власні (непублічні) експериментальні дані й декларують готовність надати їх за

запитом. Як правило – це лабораторні вимірювання вібрацій або акустичних сигналів на стендах або виробничих установках з обмеженнями доступу. У роботі [18] у розділі Data Availability прямо зазначено, що «дані, представлені в цьому дослідженні, доступні на запит кореспондуючому автору». У роботі [19] описано повноцінний вібростенд з випробуванням підшипників, шківів, крильчаток, електродвигунів, але відкритого архіву сирих даних немає (операційні дані підприємства/лабораторії). До цієї «напіввідкритої» категорії також належить ситуація, коли використовують публічні сирі дані. В той же час похідні набори ознак/результатів авторів надаються лише «за запитом» [7]. Такі практики корисні як джерело реалістичних сигналів, проте вони обмежують відтворюваність і порівнюваність. Зазначимо, що для коректного повторення експериментів необхідні: формалізований протокол доступу, чітка ліцензія й стабільне сховище.

Таблиця 2 – Використання публічних наборів даних з сенсорів, релевантних з вузлами і механізмами мобільних машин агропромислового виробництва в наукових роботах

Коротка назва наборів даних	Літературне джерело	Завдання	Протокол	Метрики
DCASE'20 T2	3	виявлення аномалій (без нагляду)	офіційний протокол DCASE	AUC, pAUC
DCASE'21 T2	4	виявлення аномалій (без нагляду)	офіційний протокол DCASE з domain shift (source/target)	AUC, pAUC
IMS	5, 6, 7	класифікація станів або прогнозований залишковий ресурс	leave-one-run/bearing-out (рекоменд.)	Accuracy, F1; RMSE, MAE
CWRU	5, 8, 10, 12	класифікація дефектів	k-fold або fixed train/test; cross-load/speed (рекоменд.)	Accuracy, F1
SEU/DDS	10, 12	класифікація (4-клас підшипник / 5-клас редуктор)	умови 20-0 / 30-2; cross-condition (рекоменд.)	Accuracy, F1
Paderborn/KAt	11, 13	класифікація станів	мультимодальність (ACC+MCSA); leave-one-bearing-out або cross-mode	Accuracy, F1
JNU	12	класифікація станів	multi-speed (600–1000 rpm); open-set (за потреби)	Accuracy, F1
PHM2009	12	класифікація станів редуктора	офіційний протокол PHM (p0–p5)	Accuracy, F1
MFPT	14	класифікація станів підшипника	стенд/польові піднабори; unit-wise або cross-load	Accuracy, F1
MaFaulDa	15	класифікація станів вузлів привода	multi-condition; multi-sensor	Accuracy, F1
Purdue Motor	17	класифікація рівня дефекту	transfer Piezo↔MEMS; cross-RPM	Accuracy, F1
UCI HIL	16	класифікація/регресія станів компонентів	cycle-wise; cross-condition (за потреби)	Accuracy, F1; MAE, RMSE

Джерело: розроблено авторами

Окрему групу становлять роботи, де використано власні експериментальні дані без будь-яких механізмів доступу для сторонніх дослідників (ані публічних архівів, ані

надання «за запитом»). При цьому типовими прикладами є лабораторні стенди для випробувань підшипників і редукторів із детально описаною апаратурою та режимами, але без репозиторіїв даних і без розділу Data Availability: [20] (аграрний контекст, підшипники та вібрації), [21] (вібродіагностика ротора на стенді, класичні ознаки + ML), [9] (приклад хвильових ознак у діагностиці роторів) та [22] (нейромережевий підхід з власними вимірами). Повна закритість отриманих наборів даних унеможливорює незалежну перевірку й пряме порівняння методів. У методологічній частині підкреслюється, що такі публікації корисні для ідей і схем вимірювань, але не формують відтворюваних еталонів і мають обмежену цінність для бенчмаркінгу архітектур обробки даних технічного стану ММАПВ.

Отже, проведений аналіз наявних джерел даних, релевантних інтелектуальній оцінці технічного стану вузлів і механізмів ММАПВ, засвідчив їхню кількісну обмеженість і фрагментарність. Крім того, не виявлено усталеної практики надання закріплених обчислювальних середовищ (Python/R/MATLAB), що гарантували б повну відтворюваність опублікованих результатів. Крім цього, доцільно супроводжувати майбутні публікації файлами залежностей (lock-files) або контейнерними образами та мінімальними інструкціями відтворення.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтування науково-методичних засад формування та використання наборів сенсорних даних для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин агропромислового виробництва та обґрунтування референтної архітектури збору та управління даними в умовах підприємств АПК, з урахуванням польових сценаріїв.

Для досягнення мети розв'язуються наступні завдання:

1. Систематизувати доступні джерела даних, виконати їх структурований опис за типами сигналів, об'єктами контролю, умовами збирання інформації про технічний стан, частотою та форматом, і виявити ключові прогалини.

2. Визначити вимоги й мінімально достатню структуру «паспорта датасету» для ММАПВ: перелік сигналів і робочих частот, еталонні режими навантаження, правила маркування станів і відмов, обов'язкові метадані (машина, експлуатаційний контекст, сервісні події), критерії якості та відтворюваності, а також вимоги до відкритості, конфіденційності та ліцензування;

3. Запропонувати референтну архітектуру збору, передачі, зберігання та підготовки даних для інтелектуальної системи технічного сервісу (ICTS) ММАПВ і надати практичні рекомендації щодо поетапного впровадження в виробничих та польових умовах.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг і обслуговування за станом (CBM – condition-based maintenance) у цій роботі розглядаються як базовий підхід до підтримання працездатності мобільних машин агропромислового виробництва. Методична основа спирається на референтну функціональну архітектуру OSA-CBM у відповідності до стандарту ISO 13374 (рівні від знімання даних і первинної обробки до виявлення станів, оцінювання «здоров'я», прогнозування залишкового ресурсу та формування рекомендацій). Для навчання й валідації алгоритмів використовуються еталонні мітки істини (ground truth), що походять із зовнішніх джерел (акти дефектування, журнали технічного обслуговування, сервісні записи) і забезпечують коректну прив'язку подій і станів.

У межах цієї рамки запропоновано узгоджений підхід до побудови сенсорних наборів даних у логіці «від глобального до детального»: від пріоритизації парку та відбору критичних вузлів до архітектури збору й управління даними, стійкої до

перебоїв зв'язку, і подальшого оброблення відповідно до OSA-CBM/ISO 13374. Сукупність рішень узагальнено трьома блок-схемами (рис. 1–3).

Першочерговим етапом є ранжування об'єктів спостереження. На рівні парку мобільних машин виокремлюються класи машин: трактори, комбайни, обприскувачі, автотранспорт тощо. Для кожного класу визначаються критичні вузли, виконується спрощена оцінка ризиків (light-FMEA) та економічних наслідків. За підсумками оцінювання визначається узагальнений бал і формується карта пріоритетів A/B/C. Для вузлів категорії А складають стислий план вимірювань: перелік потрібних сигналів, місця встановлення датчиків, робочі частоти, правила синхронізації часу та мітки подій. Відповідну логіку пріоритизації парку та формування мінімального плану сенсоризації відображено на рис. 1. Архітектуру збору й управління даними наведено на рис. 2. Блок-схему оброблення даних і підтримки рішень відповідно до OSA-CBM/ISO 13374 представлено на рис. 3.

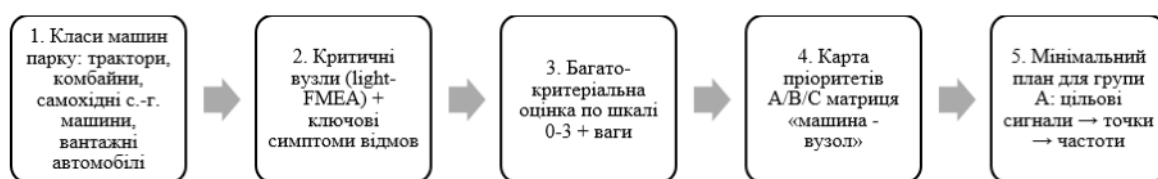


Рисунок 1 – Блок-схема пріоритизації моніторингу парку ММАПВ

Джерело: розроблено авторами

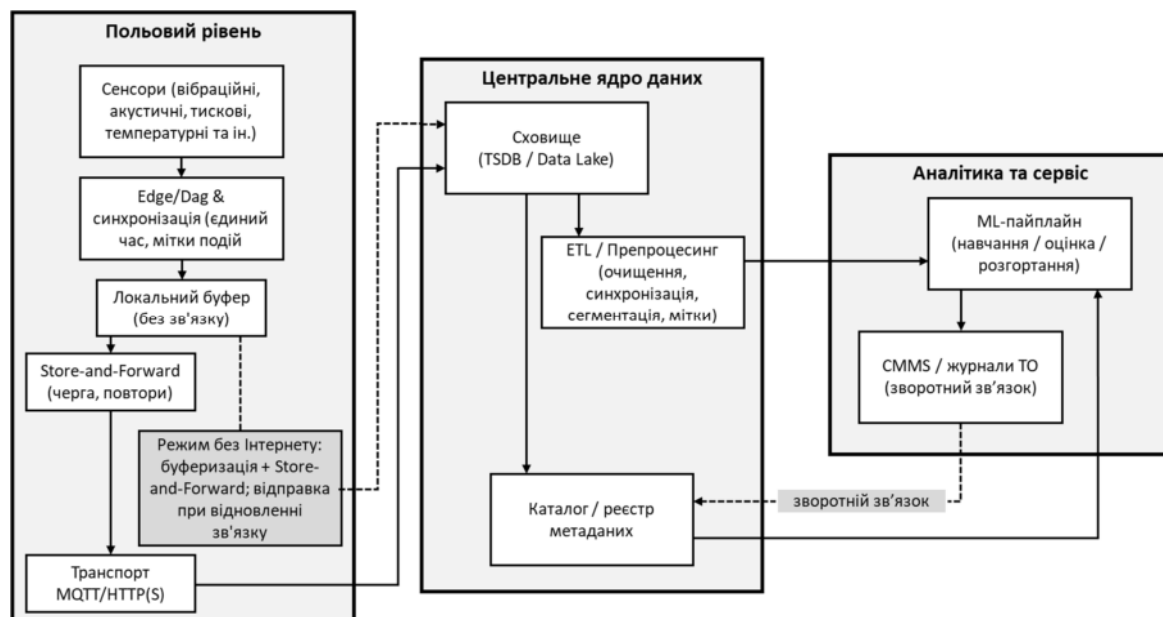


Рисунок 2 – Блок-схема архітектури збору та управління даними сенсорів.

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 3 – Блок-схема архітектури CBM за ISO 13374 (OSA-CBM)

Джерело: розроблено авторами

Пріоритизація моніторингу парку реалізується з виділенням підмножин машин та їхніх вузлів, моніторинг яких дає найбільший ефект з погляду запобігання відмовам і

скорочення простоїв. На рівні парку формалізується склад класів машин. Для кожного класу за участі експлуатаційних фахівців визначаються критичні вузли та механізми, фіксуються найбільш імовірні режими відмов і ключові діагностичні симптоми. Ці вузли стають кандидатами на первинну сенсоризацію та подальше включення в архітектуру збору даних.

Оцінювання виконується за багатокритеріальною моделлю зі зважуванням факторів: тяжкість наслідків відмови і простоїв; імовірність настання; детектовність відповідними сенсорами; сезонність й навантаження; регуляторні та безпекові вимоги; економіка простою. Інтегральний бал переводиться у категорії А/В/С (високий, середній, базовий пріоритет) із фіксацією порогів для прозорості прийняття рішень. Зазначимо, що для категорії А формулюється мінімальний план вимірювань (цільові сигнали, точки встановлення, частоти, синхронізація, мітки подій), який безпосередньо живить подальші етапи.

Очікуваними артефактами етапу є: матриця «клас машини – вузол» із позначенням рівнів пріоритету; компактна таблиця light-FMEA (вузол → типова відмова → симптом → орієнтовні сигнали і сенсори); перелік вузлів категорії А з коротким планом сенсоризації. При цьому узагальнений робочий потік відображено на рис. 1.

Архітектура реалізує принцип offline-first (архітектурний підхід, що гарантує безперервне знімання, локальне буферування та відкладену доставку даних за нестійкого зв'язку) й забезпечує тяглість телеметрії в польових умовах. На польовому рівні сенсори під'єднано до вузла збору даних на краю мережі (Edge/DAQ — edge data acquisition) з єдиним часом, синхронізованим за супутниковими навігаційними системами та мережевим протоколом часу (GNSS/NTP), і з мітками подій. Дані міжканально синхронізуються та записуються у локальний буфер. За відсутності зв'язку спрацьовує механізм store-and-forward (накопичення у черзі та гарантована повторна доставка з контролем дублювання), що спирається на ідемпотентний прийом. Передача до центрального контуру виконується протоколами з низькими накладними витратами – MQTT або HTTP(S) із керованими політиками ретрансляції та безпеки.

У центрі дані завантажуються до сховища часових рядів (TSDB) і репозиторію, що зберігає великі обсяги даних різного типу (Data Lake) з логічним поділом на сирі дані, оброблені дані, мітки та метадані. Поверх сховища працює каталог (реєстр) метаданих, у якому зберігається «паспорт датасету» (ідентифікація, канали, частоти, схеми міток, версії ПЗ/прошивок, умови ліцензування); тут же фіксуються походження даних (lineage) та версіювання релізів. Базові політики конфіденційності й доступу (анонімізовані ідентифікатори, контроль прав) задаються на рівні каталогу, що мінімізує ризики витоків чутливих атрибутів.

Шар підготовки даних (ETL – екстракція, трансформація та завантаження) очищує записи, узгоджує час, синхронізує канали й ділить потоки на вікна з урахуванням подій і станів; сформовані вибірки публікуються у вигляді версійованих релізів для конвеєра машинного навчання (ML-пайплайна). Зв'язок із системою управління технічним обслуговуванням (CMMS) двосторонній: журнали ТО й акти дефектування формують еталонні мітки, а виходи моделей повертаються як діагностичні показники. Для кожного релізу діють приймальні критерії якості (покриття, відношення сигналу до шуму, пропуски, баланс класів), що забезпечує відтворюваність.

Розглядаючи функціональну архітектуру слід зазначити, що вона узгоджена з ISO 13374 (профіль OSA-CBM) та визначає послідовність перетворень від «сирих» потоків до керувальних впливів. Рівень знімання даних (Data Acquisition) забезпечує єдиний час, первинну валідацію та доставку у сховище. Підготовка даних (Data Manipulation)

виконує наступні функції: нормалізація, синхронізація каналів; видалення артефактів; стандартна сегментація та формування ознак; чітке версіонування результатів.

На рівні виявлення стану (State Detection) реалізуються алгоритми контролю аномалій і класифікації станів (норма, перехід, деградація, відмова) з використанням міток подій і сервісних даних як ground truth. Оцінка технічного стану (Health Assessment) при цьому агрегує висновки по вузлах і формує інтегральні індикатори придатності в контексті режиму експлуатації. Блок прогнозування (Prognostics) оцінює залишковий ресурс та ймовірність відмови на горизонті планування; закладається можливість поєднання фізичних і даних-орієнтованих моделей.

Завершальний рівень — рекомендації/відображення (Advisory/Presentation) — транслює оцінки в дії: попередження, порогові тригери CBM, завдання у CMMS, а також зворотний зв'язок для уточнення міток і покращення моделей. Для кожного рівня визначено вхід і вихід, формат інтерфейсу й мінімальні метрики якості: затримка, частка пропусків, точність і recall (повнота) для станів, MAE (Mean Absolute Error), CRPS (Continuous Ranked Probability Score) для прогнозованого залишкового ресурсу, що забезпечує відтворюваність та порівнянність реалізацій (рис. 3).

Дослідження показало, що для відтворюваності та порівнянності результатів кожен реліз даних супроводжується «паспортом» мінімального складу: ідентифікація та версія; об'єкт та межі застосування (клас машини, вузол, сценарій); канали й частоти знімання, синхронізація часу та мітки подій; схема маркування станів і джерела ground truth; опис препроцесингу й версій програмного забезпечення; умови доступу й ліцензування та правила анонімізації.

Пропонується контроль якості релізу (acceptance gates), який полягає в наступному:

- покриття режимів – наявність репрезентативних інтервалів «норма, перехід, деградація» для вибраних вузлів;
- синхронізація каналів – похибка не більше ~ 5 мс між високочастотними каналами; узгоджені таймштампи;
- пропуски й артефакти — не більш як ~ 1 % пропусків на канал після очищення; задокументовані методи обробки артефактів;
- якість сигналу – мінімальні вимоги до відношення сигналу до шуму та до спектральних показників, а також відсутність систематичного зсуву та дрейфу;
- класовий баланс і відтворюваність – бажано, щоб дисбаланс не перевищував орієнтовно 10:1, а якщо це неможливо, то слід описати обрану процедуру балансування;
- дані мають надходити щонайменше з кількох машин або кількох циклів роботи;
- версіонування та походження – застосовуються семантичні версії з коротким журналом змін і фіксацією ланцюга перетворень (lineage) для кожного релізу.

Висновки. 1. Запропоновано та апробовано методологічний підхід до формування та використання сенсорних даних для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин агропромислового виробництва, що узгоджено з логікою «від глобального до детального» і профілем OSA-CBM/ISO 13374. Підхід забезпечує відтворюваність та придатність даних до застосування у задачах діагностики, прогнозування та підтримки прийняття рішень у сервісних процесах підприємств агропромислового комплексу.

2. Систематизовано доступні джерела даних, зібрано та структуровано публічні набори даних, узагальнено непрямі і закриті джерела; показано дефіцит даних саме для оцінки технічного стану вузлів мобільних машин агропромислового виробництва.

3. Визначено вимоги до наборів даних та сформовано «паспорт датасету» мінімального складу (сигнали, частоти, синхронізація та мітки, ground truth, метадані, правовий режим), а також задано приймальні критерії (acceptance gates) для релізів.

4. Запропоновано референтну архітектуру offline-first для збору та управління даними (польовий рівень → транспорт → TSDB/Data Lake → каталог → ETL → ML-контур → CMMS) та функціональну блок-схему CBM за ISO 13374, що разом зі схемою пріоритизації утворюють узгоджений конвеєр.

Список літератури

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О. В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В. В. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2020. 428 с.
2. Матвієнко О. О., Аулін В. В. Класифікація типів сигналів та методів машинного навчання для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин підприємств агропромислового виробництва. *Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки*. 2025. № 11(42)_II. С. 298–312. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.298-312.
3. Wang Y., Zheng Y., Zhang Y., Xie Y., Xu S., Hu Y., He L. Unsupervised anomalous sound detection for machine condition monitoring using classification-based methods. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 23. 11128. DOI: 10.3390/app112311128.
4. Cheng T., Guo F. Machine anomalous sound detection based on audio synthesis generative adversarial network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2816, No. 1. 012041. DOI: 10.1088/1742-6596/2816/1/012041.
5. Khorram A., Khaloee M., Rezghi M. End-to-end CNN + LSTM deep learning approach for bearing fault diagnosis. *Applied Intelligence*. 2021. Vol. 51, No. 2. P. 736–751. DOI: 10.1007/s10489-020-01859-1.
6. Chegini S. N., Manjili M. J. H., Bagheri A. New fault diagnosis approaches for detecting the bearing slight degradation. *Meccanica*. 2020. Vol. 55, No. 1. P. 261–286. DOI: 10.1007/s11012-019-01116-x.
7. Brito L. C., Susto G. A., Brito J. N., Duarte M. A. V. Fault detection of bearing: An unsupervised machine learning approach exploiting feature extraction and dimensionality reduction. *Informatics*. 2021. Vol. 8, No. 4. 85. DOI: 10.3390/informatics8040085.
8. Attaran B., Ghanbarzadeh A., Moradi S. A novel intelligent fault diagnosis approach for critical rotating machinery in the time-frequency domain. *International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects*. 2020. Vol. 33, No. 4. P. 668–675. DOI: 10.5829/ije.2020.33.04a.18.
9. Bouaouiche K., Menasria Y., Khalfa D. Diagnosis of rotating machine defects by vibration analysis. *Acta IMEKO*. 2023. Vol. 12, No. 1. P. 1–6. DOI: 10.21014/actaimeko.v12i1.1438.
10. Singh M. T. Graph-based fault diagnosis for rotating machinery: Adaptive segmentation and structural feature integration. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2504.20756. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.20756>.
11. Matania O., Bachar L., Bechhoefer E., Bortman J. Signal processing for the condition-based maintenance of rotating machines via vibration analysis: A tutorial. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 2. 454. DOI: 10.3390/s24020454.
12. Zhang B., Zhou C., Li W., Ji S., Li H., Tong Z., Ng S.-K. Intelligent bearing fault diagnosis based on open set convolutional neural network. *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 21. 3953. DOI: 10.3390/math10213953.
13. Lessmeier C., Kimotho J. K., Zimmer D., Sextro W. Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: A benchmark data set for data-driven classification. In: *Proceedings of the European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2016 (PHME 2016)*, 5–8 July 2016, Bilbao, Spain. PHM Society, 2016. URL: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phme/article/view/1577>.
14. Saad A., Usman A., Arif S., Liwicki M., Almqvist A. Bearing fault detection scheme using machine learning for condition monitoring applications. In: *Proceedings of the International Conference on Mechanical, Automotive and Mechatronics Engineering (ICMAME 2023)*, 29–30 April 2023, Dubai, UAE. 2023. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1793876/FULLTEXT01.pdf>.
15. Ignjatovska A., Shishkovski D., Pecioski D. Classification of present faults in rotating machinery based on time and frequency domain feature extraction. *Vibroengineering Procedia*. 2023. Vol. 51. P. 22–28. DOI: 10.21595/vp.2023.23667.
16. Zhang D., Zheng K., Liu F., Li B. Fault diagnosis of hydraulic components based on multi-sensor information fusion using improved TSO-CNN-BiLSTM. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 8. 2661. DOI: 10.3390/s24082661.
17. Abdallah M., Joung B.-G., Lee W. J., Mousoulis C., Raghunathan N., Shakouri A., Sutherland J. W., Bagchi S. Anomaly detection and inter-sensor transfer learning on smart manufacturing datasets. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 1. 486. DOI: 10.3390/s23010486.
18. Ciaburro G., Iannace G. Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 20. 10476. DOI: 10.3390/app122010476.

19. Rahman A., Hoque M. E., Rashid F., Alam F., Ahmed M. M. Health condition monitoring and control of vibrations of a rotating system through vibration analysis. *Journal of Sensors*. 2022. Article ID 4281596. DOI: 10.1155/2022/4281596.
20. Kateris D., Moshou D., Gialamas T., Gravalos I., Xyradakis P. Bearing fault diagnosis in mechanical gearbox, based on time and frequency-domain parameters with MLP-ARD. *Journal of Agricultural Machinery Science*. 2014. Vol. 10, No. 2. P. 101–106. URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/558529>.
21. Elsamanty M. M., Salman W. S., Ibrahim A. A. Fault diagnosis of rotary machines based on vibration signature and machine learning algorithm. *Engineering Research Journal (Shoubra)*. 2021. Vol. 50, No. 1. P. 41–47. DOI: 10.21608/erjsh.2021.225704.
22. Oulmane A., Lakis A. A., Mureithi N. W. Application of Fourier descriptors and artificial neural network to bearing vibration signals for fault detection and classification. *Universal Journal of Aeronautical & Aerospace Sciences*. 2014. Vol. 2. P. 37–54. URL: <https://www.papersciences.com/Oulmane-Univ-J-Aer-Aerosp-Scien-Vol2-2014-3.pdf>.
23. Koizumi Y., Kawaguchi Y., Imoto K., Nakamura T., Nikaido Y., Tanabe R., Purohit H., Suefusa K., Endo T., Yasuda M., Harada N. DCASE 2020 Challenge Task 2 Development Dataset. Version 1.0. [Dataset]. Zenodo. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3678171.
24. Kawaguchi Y., Imoto K., Koizumi Y., Harada N., Niizumi D., Dohi K., Tanabe R., Purohit H., Endo T. DCASE 2021 Challenge Task 2 Development Dataset. Version 1.0. [Dataset]. Zenodo. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.4562016.
25. National Aeronautics and Space Administration (NASA). IMS Bearings. [Dataset]. NASA Open Data Portal. 2023. URL: <https://data.nasa.gov/dataset/ims-bearings> (дата звернення: 1.09.2025).
26. Case Western Reserve University Bearing Data Center : веб-сайт. URL: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> (дата звернення: 1.09.2025).
27. Cathy Siyu. Mechanical-datasets. [Dataset]. GitHub. URL: <https://github.com/cathysiyu/Mechanical-datasets> (дата звернення: 1.09.2025).
28. Paderborn University, Chair of Design and Drive Technology (KAT). Bearing Datacenter: Data sets and download. [Dataset]. URL: <https://mb.uni-paderborn.de/kat/forschung/kat-datacenter/bearing-datacenter/data-sets-and-download> (дата звернення: 1.09.2025).
29. Clark Gable Wang. JNU-Bearing-Dataset. [Dataset]. GitHub. URL: <https://github.com/ClarkGableWang/JNU-Bearing-Dataset> (дата звернення: 1.09.2025).
30. Prognostics and Health Management Society (PHM Society). Public data sets : веб-сторінка. URL: <https://phmsociety.org/public-data-sets/> (дата звернення: 1.09.2025).
31. Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT). Fault data sets : веб-сторінка. URL: <https://www.mfpt.org/fault-data-sets/> (дата звернення: 1.09.2025).
32. josh101. Machinery Fault Database — Induction Motor Fault. [Dataset]. Kaggle. URL: www.kaggle.com/datasets/josh101/machinery-fault-database-induction-motor-fault (дата звернення: 1.09.2025).
33. Purdue University. Purdue Motor dataset. [Dataset]. Google Drive. URL: drive.google.com/drive/u/2/folders/1QX3chnSTKO3PsEhi5kBd9WwMBmOriJ8 (дата звернення: 1.09.2025).
34. UCI Machine Learning Repository. Condition monitoring of hydraulic systems. [Dataset]. University of California, Irvine. URL: archive.ics.uci.edu/dataset/447/condition+monitoring+of+hydraulic+systems (дата звернення: 1.09.2025).

References

1. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Holovaty, A. O., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Kuzyk, O. V., & Tykhyi, A. A. (2020). Methodological foundations of design and operation of intelligent transportation and manufacturing systems. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Matviienko, O. O., Aulin V.V. (2025). *Classification of signal types and machining methods for intelligent assessment of the technical mill of mobile machines for agro-industrial production*. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (11(42)_II), 298-312. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.298-312](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.298-312) [in Ukrainian].
3. Wang, Y., Zheng, Y., Zhang, Y., Xie, Y., Xu, S., Hu, Y., & He, L. (2021). *Unsupervised anomalous sound detection for machine condition monitoring using classification-based methods*. *Applied Sciences*, 11(23), 11128. <https://doi.org/10.3390/app112311128>
4. Cheng, T., & Guo, F. (2024). *Machine anomalous sound detection based on audio synthesis generative adversarial network*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2816(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2816/1/012041>
5. Khorram, A., Khalooei, M., & Rezaghi, M. (2021). *End-to-end CNN + LSTM deep learning approach for bearing fault diagnosis*. *Applied Intelligence*, 51(2), 736–751. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01859-1>
6. Chegini, S. N., Manjili, M. J. H., & Bagheri, A. (2020). *New fault diagnosis approaches for detecting the bearing slight degradation*. *Meccanica*, 55(1), 261–286. <https://doi.org/10.1007/s11012-019-01116-x>

7. Brito, L. C., Susto, G. A., Brito, J. N., & Duarte, M. A. V. (2021). *Fault detection of bearing: An unsupervised machine learning approach exploiting feature extraction and dimensionality reduction. Informatics*, 8(4), 85. <https://doi.org/10.3390/informatics8040085>
8. Attaran, B., Ghanbarzadeh, A., & Moradi, S. (2020). *A novel intelligent fault diagnosis approach for critical rotating machinery in the time-frequency domain. International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*, 33(4), 668–675. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.04a.18>
9. Bouaouiche, K., Menasria, Y., & Khalfa, D. (2023). *Diagnosis of rotating machine defects by vibration analysis. Acta IMEKO*, 12(1), 1–6. <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v12i1.1438>
10. Singh, M. T. (2025). *Graph-based fault diagnosis for rotating machinery: Adaptive segmentation and structural feature integration. arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2504.20756>
11. Matania, O., Bachar, L., Bechhoefer, E., & Bortman, J. (2024). *Signal processing for the condition-based maintenance of rotating machines via vibration analysis: A tutorial. Sensors*, 24(2), 454. <https://doi.org/10.3390/s24020454>
12. Zhang, B., Zhou, C., Li, W., Ji, S., Li, H., Tong, Z., & Ng, S.-K. (2022). *Intelligent bearing fault diagnosis based on open set convolutional neural network. Mathematics*, 10(21), 3953. <https://doi.org/10.3390/math10213953>
13. Lessmeier, C., Kimotho, J. K., Zimmer, D., & Sextro, W. (2016). *Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: A benchmark data set for data-driven classification. In Proceedings of the European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2016 (PHME 2016), Bilbao, Spain. PHM Society*. <https://papers.phmsociety.org/index.php/phme/article/view/1577>
14. Saad, A., Usman, A., Arif, S., Liwicki, M., & Almqvist, A. (2023, April 29–30). *Bearing fault detection scheme using machine learning for condition monitoring applications. In Proceedings of the International Conference on Mechanical, Automotive and Mechatronics Engineering (ICMAME 2023), Dubai, United Arab Emirates*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1793876/FULLTEXT01.pdf>
15. Ignjatovska, A., Shishkovski, D., & Pecioski, D. (2023, October 20–21). *Classification of present faults in rotating machinery based on time and frequency domain feature extraction. Vibroengineering Procedia*, 51, 22–28. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23667>
16. Zhang, D., Zheng, K., Liu, F., & Li, B. (2024). *Fault diagnosis of hydraulic components based on multi-sensor information fusion using improved TSO-CNN-BiLSTM. Sensors*, 24(8), 2661. <https://doi.org/10.3390/s24082661>
17. Abdallah, M., Joung, B.-G., Lee, W. J., Mousoulis, C., Raghunathan, N., Shakouri, A., Sutherland, J. W., & Bagchi, S. (2023). *Anomaly detection and inter-sensor transfer learning on smart manufacturing datasets. Sensors*, 23(1), 486. <https://doi.org/10.3390/s23010486>
18. Ciaburro, G., & Iannace, G. (2022). *Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. Applied Sciences*, 12(20), 10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
19. Rahman, A., Hoque, M. E., Rashid, F., Alam, F., & Ahmed, M. M. (2022). *Health condition monitoring and control of vibrations of a rotating system through vibration analysis. Journal of Sensors*, 2022, Article 4281596. <https://doi.org/10.1155/2022/4281596>
20. Kateris, D., Moshou, D., Gialamas, T., Gravalos, I., & Xyradakis, P. (2014). *Bearing fault diagnosis in mechanical gearbox, based on time and frequency-domain parameters with MLP-ARD. Journal of Agricultural Machinery Science*, 10(2), 101–106. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/558529>
21. Elsamanty, M. M., Salman, W. S., & Ibrahim, A. A. (2021). *Fault diagnosis of rotary machines based on vibration signature and machine learning algorithm. Engineering Research Journal (Shoubra)*, 50(1), 41–47. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2021.225704>
22. Oulmane, A., Lakis, A. A., & Mureithi, N. W. (2014). *Application of Fourier descriptors and artificial neural network to bearing vibration signals for fault detection and classification. Universal Journal of Aeronautical & Aerospace Sciences*, 2, 37–54. www.papersciences.com/Oulmane-Univ-J-Aer-Aerosp-Scien-Vol2-2014-3.pdf
23. Koizumi, Y., Kawaguchi, Y., Imoto, K., Nakamura, T., Nikaido, Y., Tanabe, R., Purohit, H., Suefusa, K., Endo, T., Yasuda, M., & Harada, N. (2020, March 1). *DCASE 2020 Challenge Task 2 Development Dataset (Version 1.0) [Dataset]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3678171>
24. Kawaguchi, Y., Imoto, K., Koizumi, Y., Harada, N., Niizumi, D., Dohi, K., Tanabe, R., Purohit, H., & Endo, T. (2021, March 1). *DCASE 2021 Challenge Task 2 Development Dataset (Version 1.0) [Dataset]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4562016>
25. National Aeronautics and Space Administration. (2023, November 2). *IMS Bearings [Dataset]*. NASA Open Data Portal. <https://data.nasa.gov/dataset/ims-bearings>
26. Case Western Reserve University. (n.d.). *Bearing Data Center*. Case School of Engineering. <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter>

27. Cathy Siyu. (n.d.). *Mechanical-datasets* [Dataset]. GitHub. github.com/cathysiyu/Mechanical-datasets.
28. Paderborn University, Chair of Design and Drive Technology (KAt). (n.d.). *Bearing Datacenter: Data sets and download* [Dataset]. mb.uni-paderborn.de/kat/forschung/kat-datacenter/bearing-datacenter/data-sets-and-download
29. Clark Gable Wang. (n.d.). *JNU-Bearing-Dataset* [Dataset]. GitHub. github.com/ClarkGableWang/JNU-Bearing-Dataset.
30. Prognostics and Health Management Society. (n.d.). *Public data sets*. PHM Society. phmsociety.org/public-data-sets/.
31. Society for Machinery Failure Prevention Technology. (n.d.). *Fault data sets*. MFPT. www.mfpt.org/fault-data-sets/.
32. josh101. (n.d.). *Machinery Fault Database — Induction Motor Fault* [Dataset]. Kaggle. www.kaggle.com/datasets/josh101/machinery-fault-database-induction-motor-fault.
33. Purdue University. (n.d.). *Purdue Motor dataset* [Dataset]. Google Drive. <https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1QX3chnSTKO3PsEhi5kBdf9WwMBmOriJ8>.
34. UCI Machine Learning Repository. (n.d.). Condition monitoring of hydraulic systems [Dataset]. University of California, Irvine. <https://archive.ics.uci.edu/dataset/447/condition+monitoring+of+hydraulic+systems>.

Oleksandr Matviienko Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Aulin**, Prof., Dr. tech. sci.,

Andriy Grynkiy, Sr. Researcher, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Status and Development Directions of Data Architecture for Intelligent Assessment of the Technical Condition of Mobile Machines of Agro-Industrial Enterprises

This article provides a critical survey and a practical method for assembling sensor datasets that support intelligent assessment of the technical condition of mobile agricultural machines. The survey maps available sources and shows that domain-relevant datasets are scarce, fragmented, and rarely documented with stable collection procedures. To address these gaps, the paper proposes a coherent “global to detail” pathway that links fleet decisions, field acquisition, and analytics into a reproducible blueprint.

The pathway begins with fleet-level prioritization that identifies machine classes and critical components, outlines typical failure modes and observable symptoms, and balances severity, likelihood, detectability, seasonal load, safety, and downtime costs. The result is a prioritized roadmap for sensor installation and a compact measurement plan specifying signals, installation points, sampling frequencies, and event time-stamping.

Data collection and management follow an offline-first architecture suitable for unstable connectivity in fields. Sensors feed an edge acquisition unit with unified time derived from global navigation satellite systems and the network time protocol; measurements are buffered locally and delivered with store-and-forward when links reappear, using lightweight message transports such as message queue telemetry and secure hypertext transfer. In the central environment, data land in a time-series repository or data lake governed by a metadata catalog that records dataset passports, provenance, versions, privacy and access rules, and licensing terms. A preprocessing layer performs extraction, transformation and loading, cleans artifacts, harmonizes time, and segments streams into versioned releases for model development.

Analytics follow the functional reference defined by the ISO 13374 for condition monitoring: acquisition, manipulation, state detection, health assessment, prognostics with remaining useful life estimation, and advisory generation with integration into computerized maintenance management systems. Each dataset release carries a minimal passport and acceptance gates that verify regime coverage, synchronization accuracy, limits on missing data, signal-to-noise quality, class balance, and explicit lineage with semantic versioning. The survey also found no sources providing pinned computational environments that guarantee full reproducibility; future publications should include dependency lock files or container images and concise replication guides.

mobile machines, agricultural production, intelligent system, technical service, machine learning, predictive technical maintenance, multisensory diagnostics, diagnostic signals, anomaly detection

Одержано (Received) 15.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 621.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.238-244](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.238-244)**І. М. Микитій**, д.ф.*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: mukutiy@gmail.com*

Експериментальні дослідження підвищення енергозбереження силових приводів при їхньому переведенні на газоподібні продукти конвертації метанолу

У статті представлені результати експерименту, спрямованого на дослідження продуктивності серійного дизельного двигуна D21A1, модернізованого для роботи на газоподібних продуктах, отриманих в результаті конверсії метанолу, як альтернативному паливі. Проведені випробування експериментально підтвердили доцільність та потенційні переваги переобладнання дизельних двигунів для роботи на паливі, отриманому з метанолу. Для оцінки впливу різних факторів на підвищення паливної ефективності було проведено серію експериментів з використанням реактора конверсії метанолу. Результати показали, що термохімічне використання тепла зменшило витрату палива на 6–8%, а оптимізація робочого процесу двигуна забезпечила додаткову економію палива приблизно на 4–6%. Для більш глибокого аналізу факторів, що сприяють покращенню паливної економічності, було проведено подальші експериментальні дослідження. Вони підтвердили переваги використання газоподібних продуктів конверсії метанолу, що призвело до збільшення ефективної потужності двигуна на 14% порівняно зі звичайним дизельним паливом, хоча й з незначним збільшенням витрати палива. Враховуючи, що середня вартість метанолу становить лише 10–20% від ціни дизельного палива, переобладнання дизельних двигунів для роботи на продуктах конверсії метанолу виявляється економічно вигідним.

енергозбереження, дизельний двигун, ефективна потужності, альтернативне паливо, метиловий спирт, газова суміш, відпрацьовані гази

Постановка проблеми. Більшість транспортних засобів нафтогазової галузі та інших сфер оснащені двигунами внутрішнього згоряння з дизельними системами живлення. Робота таких двигунів потребує значних обсягів дорогого дизельного пального, яке, до того ж, спричиняє високу токсичність відпрацьованих газів. Це зумовлює доцільність переходу на більш доступні та екологічно чисті альтернативні види палива [2]. Тривала експлуатація дизельних двигунів у нафтогазовому секторі, навіть після завершення їх виробництва, зумовлює необхідність їх адаптації до більш економічних та екологічно прийнятних видів палива, таких як газ. Одним з перспективних рішень для використання метанолу в поршневих двигунах, що дозволяє обійти його відомі недоліки, є його термохімічна конверсія. Цей процес передбачає використання тепла відпрацьованих газів для хімічного перетворення метанолу в суміш горючих газів (CO , H_2 , CH_4) за допомогою термохімічної установки, що є комплексом технологій утилізації тепла для здійснення ендотермічної реакції конверсії. В результаті конверсії хімічна енергія отримана з продуктів конверсії метанолу перевищує енергію вихідного палива на величину утилізованої енергії вихлопних газів, яка таким чином повторно бере участь в організації робочого циклу [3]. Первинною оцінкою ефективності термохімічного перетворення палива є порівняння теплотворної здатності вихідного палива та отриманих продуктів. Відомо, що для етанолу цей процес може збільшити теплоту згоряння на 6–25%, що потенційно призводить до зменшення необхідної кількості палива для виробництва заданої кількості енергії. Застосування подібної технології термохімічного перетворення метанолу розглядається як спосіб підвищення економічності енергетичних установок, що працюють на метанолі. Крім того, це відкриває перспективи для безпечного використання продуктів конверсії метанолу в різних типах двигунів, де застосування рідкого метанолу є небажаним через

його негативний вплив на змащування та зношування деталей. Отже, метою даної наукової роботи є дослідження основних експлуатаційних параметрів двигуна при використанні процесу термохімічного перетворення етанолу з використанням вторинного тепла відпрацьованих газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз різних джерел з цієї проблеми показує на те, що поки немає точних відомостей щодо енерговитрат трансмісій підймальних установок для ремонту свердловин нафтогазової галузі [2] та про параметри експлуатації дизельних двигунів, які конвертовані на альтернативну паливну газову суміш, яка складається з продуктів конверсії метанолу. На показники енергоспоживання трансмісій впливають температурні умови навколишнього середовища та на самі агрегати трансмісії. Водночас, на енергетичну цінність альтернативної газової паливної суміші, отриманої з продуктів конверсії метанолу, ключовий вплив має кількість теплової енергії, переданої від відпрацьованих газів.

Слід зазначити, що факторні плани експериментів гарантують отримання достовірних значень коефіцієнтів у рівняннях регресії при мінімальній кількості дослідів лише за умови, що порядок регресійного рівняння відомий до початку експерименту. Більше того, застосування факторних планів можливе лише при наявності достатньо конкретних теоретичних знань про досліджувані процеси.

У випадках, коли характер залежностей між основними досліджуваними факторами є невідомим, використання стандартного факторного плану може призвести до хибних висновків. Наприклад, у контексті дослідження процесів отримання газоподібних продуктів конверсії метанолу можлива наявність локальних екстремумів у залежностях виходу газоподібних або рідких продуктів від кількості переданого тепла вихлопних газів, що ускладнює застосування традиційних факторних планів.

Що стосується виходу газоподібних продуктів конверсії метанолу, то за результатами аналізу літературних джерел [6, 7] можна зробити обґрунтований висновок, що головним чинником утворення газоподібних продуктів конверсії метанолу є кількість переданої теплоти та температура відпрацьованих газів. Головною метою в даних експериментах було запропоновано склад остаточних продуктів палива (рідких і газоподібних). Основними змінними чинниками, що визначають цей склад, є температури відпрацьованих газів та метанолу, темп прогрівання двигуна, склад продуктів конверсії метанолу.

Постановка завдання. Основна мета дослідження полягає у визначенні можливостей підвищення енергоефективності силових приводів шляхом їх переведення на газоподібне паливо, отримане з метанолу. Експериментальна частина роботи була спланована таким чином, щоб мінімізувати похибки вимірювань та забезпечити надійність отриманих даних.

Завдання, які необхідно вирішити:

- забезпечення коректної оцінки випадкових похибок;
- мінімізація систематичних помилок;
- підтримка стабільності характеристик палива протягом усього експерименту;
- забезпечення відтворюваності експериментальних умов та стабілізація зовнішніх факторів, що можуть впливати на результати.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися з метою оцінки енергозбереження силових приводів шляхом їх переведення на газоподібне паливо з метанолу. Увага була приділена всебічному порівнянню паливно-економічних характеристик та показників потужності дизельного двигуна Д21А1, який пройшов переобладнання, оцінюючи його роботу на традиційному дизельному паливі та на газоподібних продуктах метанолу. Для реалізації цього двигун був дооснащений

термохімічним реактором, який використовував тепло відпрацьованих газів для перетворення рідкого метанолу в газоподібну суміш, що потім через газовий редуктор подавалася у впускний колектор. Кількість спожитого палива фіксувалася електронною вагою.

Експериментальний стенд був сконструйований таким чином, щоб забезпечити роботу двигуна в трьох режимах подачі палива: розпилення рідкого дизельного палива форсунками, подача газоподібних продуктів конверсії метанолу через газовий редуктор та розпилення рідкого метанолу форсунками. Подача метанолу з паливного бака здійснювалася електричним насосом через регулятор, що підтримував тиск 0,5 МПа для оптимізації його подачі з урахуванням низької теплоти згоряння. Регулювання паливо-повітряної суміші забезпечувалося дросельною заслінкою. Для конверсії метанолу використовувалося тепло вихлопних газів або автономний підігрівач Вебасто (для пуску та прогріву). Додатковий підігрівач Вебасто Термо Тор С (5 кВт) встановлювався перед газовим редуктором для забезпечення надійного холодного пуску на газоподібному метанолі та відключався при досягненні температури вихлопних газів 300 °С. Реактор конверсії метанолу був інтегрований у випускную систему двигуна.

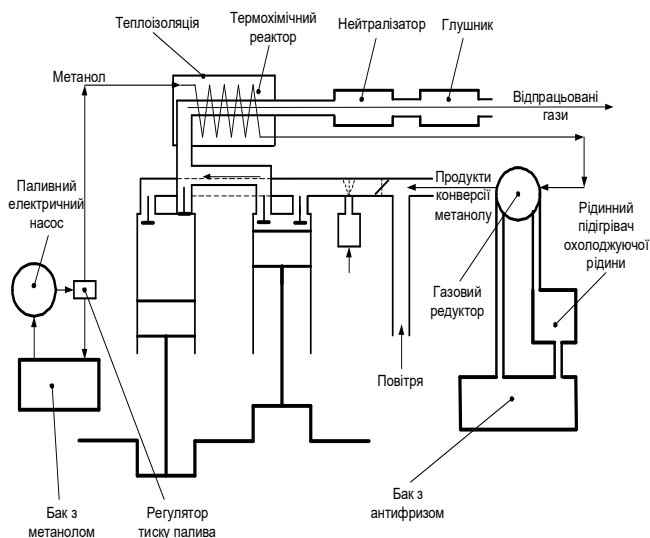


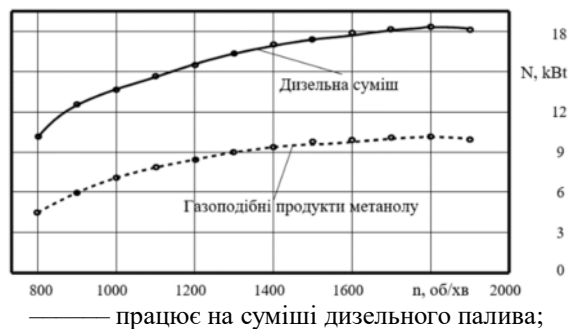
Рисунок 1 – Відображає схематичне зображення експериментального стенду з ключовим елементом – термохімічним реактором, який використовувався для вивчення показників роботи дизельного двигуна Д21А1 при використанні газоподібних продуктів метанолу як палива Джерело: розроблено на підставі [7].

Усі експерименти проводилися в стабільних лабораторних умовах (температура 293-296 К). Для точного вимірювання температур вихлопних газів та газоподібних продуктів метанолу використовувалися як контактні (хромель-копелеві термопари), так і безконтактні (цифровий пірометр) методи [7]. Для забезпечення достовірності результатів кожен експеримент при фіксованих параметрах повторювався не менше п'яти разів. Дослідження проводилися при повному навантаженні двигуна на різних фіксованих обертах (800-1800 об/хв) з використанням методики, що відповідають вимогам ГОСТ 14846-91 для стаціонарних режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння.

На рисунку 2 представлені експериментальні дані, що ілюструють зовнішню швидкісну характеристику дизельного двигуна моделі Д21А1. На графіку демонструється порівняння продуктивності двигуна при використанні стандартного дизельного палива та газоподібних продуктів конвертації метанолу, причому останнє досліджувалося за фіксованого співвідношення повітря до метанолу 14,3 кг/кг.

Рисунок 3 ілюструє експериментально отримані зовнішні швидкісні характеристики переробленого двигуна Д21А1 при його застосуванні дизельного

палива, метанолу та продуктах його конверсії в рамках випробувальних циклів. Аналіз експериментальних значень ефективної потужності (N) виявив, що при номінальній частоті обертання колінчастого вала (1800 хв^{-1}) потужність становила 18,1 кВт при використанні дизельного палива та 10,1 кВт при роботі на продуктах перетворення метанолу (при співвідношенні 1 кг метанолу на 14,3 кг повітря). В цілому, у всьому дослідженому діапазоні швидкості обертання двигуна, потужність двигуна при роботі на газоподібних продуктах метанолу була на 45% меншою, як при використанні дизельного палива.



..... працює на газоподібних продуктах метанолу;

Рисунок 2 – Експериментально отримані значення корисної потужності двигуна (N) від його частоти обертання (n) при використанні різних видів моторного палива

Джерело: розроблено на підставі [7].

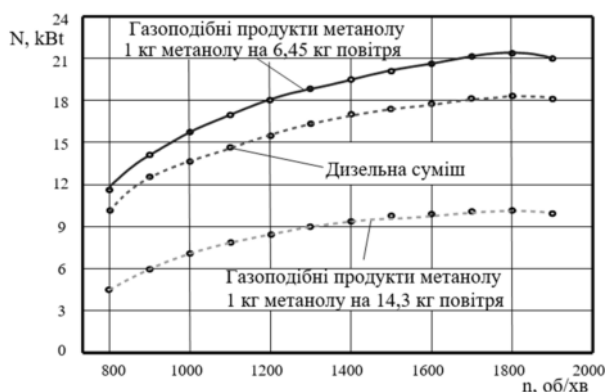


Рисунок 3 – Ілюструє експериментальні значення залежності ефективної потужності (N) досліджуваного двигуна від його швидкості обертання (n) для досліджених палив

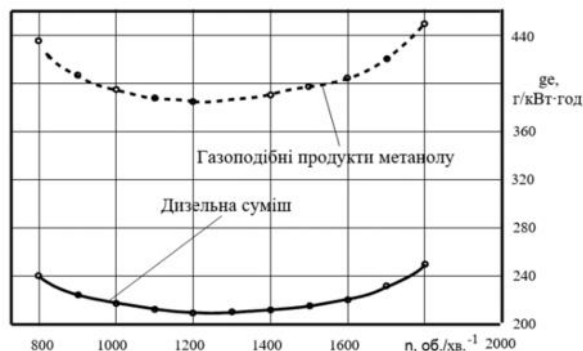
Джерело: розроблено на підставі [7].

З аналізу експериментальних даних щодо потужності, представлених на рисунку 3, виявлено, що на високих обертах колінчастого вала (1800 хв^{-1}) ефективна потужність двигуна при роботі на продуктах перетворення метанолу (із співвідношенням 1 кг метанолу на 6,45 кг повітря) досягала 21,2 кВт. На протязі усього дослідження із зміною швидкості обертання двигуна, значення потужності двигуна при застосуванні газоподібних продуктів метанолу (1:6,45) збільшилося на 14% стосовно його роботи на дизельній суміші.

Рисунок 4 демонструє експериментально отримані залежності витрати палива при різній швидкості обертання (n) дизельного двигуна Д21А1 при застосуванні дизельного палива, так і на газових продуктах метанолу при співвідношенні повітря до метанолу 14,3 кг/кг.

Аналіз експериментальних значень питомої витрати палива виявив, що при роботі на дизельному паливі мінімальне значення цього показника ($212 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$) спостерігалось в діапазоні обертів $1200\text{--}1250 \text{ хв}^{-1}$, а при високих обертах колінчастого вала (1800 хв^{-1}) становило $248 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$. При використанні газоподібних продуктів метанолу мінімальне споживання палива зросло до $386 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$, а на високих

обертах двигуна – до 451 г/(кВт·год). У середньому, по всьому діапазону роботи двигуна, витрати палива при роботі на газоподібних продуктах метанолу (при співвідношенні 14,3 кг повітря на 1 кг метанолу) збільшилися на 80-84% порівняно з дизельним паливом. Також було проведено порівняльне дослідження роботи двигуна на рідкому метанолі та на продуктах його перетворення. Результати показали, що при роботі на газоподібних продуктах метанолу спостерігалось зменшення витрати палива яке складає 10-14% залежності від обертів колінчастого вала та його навантаження на двигун, порівняно з використанням рідкого метанолу.



— двигун працює на суміші дизельного палива; двигун працює на газоподібних продуктах метанолу;

Рисунок 4 – Ілюструє експериментальні значення витрати палива в залежності від обертів (n) двигуна для різних видів палива

Джерело: розроблено на підставі [7].

Для кількісної оцінки впливу різних факторів на підвищення економічності двигуна було проведено експерименти при яких застосовано реактор для конверсії метанолу з незалежним електричним нагрівачем, що виконувало роботу без регенерації тепла вихлопних газів. Встановлено, що економія палива за рахунок термохімічної утилізації теплоти становила 6-8%, а завдяки вдосконаленню робочого процесу – близько 4-6%. З метою детального аналізу, що сприяють для більшої паливної економічності досліджуваного двигуна, було проведено кілька експериментальних досліджень. На першому етапі цих випробувань в циліндри двигуна подавали суміш-газу, склад якого (за об'ємними частками) був аналогічним складу газоподібних продуктів метанолу: 33% CO та 67% H₂.

Використання автономного електричного підігрівача унеможливило прояв ефекту утилізації тепла вихлопних газів. Однак, при роботі двигуна з термохімічним реактором відбувалася утилізація тепла відпрацьованих газів, яке перетворювалося на газоподібне паливо з покращеними енергетичними властивостями, що забезпечувало роботу двигуна за регенеративним циклом. Оскільки склад палива в обох випадках був незмінним, покращення паливної економічності, зафіксоване в ході експериментів, безсумнівно є наслідком термохімічної регенерації енергії вихлопних газів. На рисунку 5 показано дослідження витрати палива в залежності від швидкості обертання (n) дизельного двигуна D21A1 при застосуванні різних видів палива, та газоподібних продуктів метанолу.

Аналіз дослідження витрати палива показує мінімальні значення витрати для дизельного палива: 212 г/(кВт·год) при середніх обертах (1200- хв⁻¹), для газових продуктів метанолу 386 г/(кВт·год) та для метанолу 460 г/(кВт·год). При високих обертах двигуна (1800 хв⁻¹) споживання палива складає для дизеля 248 г/(кВт·год), для газових продуктів метанолу 451 г/(кВт·год) та для метанолу 545 г/(кВт·год).

У середньому, при різних режимах обертання двигуна, витрати палива при роботі на 100% газоподібних продуктах метанолу була на 81-85% вищою, а при роботі на 100% метанолі – на 116-120% вищою, ніж при використанні дизельного палива.

Експерименти також показали, що використання термохімічного реактора на всіх навантажувальних режимах двигуна призвело до покращення економічних показників робочого циклу в середньому на 10-14% порівняно з роботою на чистому метанолі. При низьких обертах (850 хв^{-1}) економічність була близькою до показників при роботі на рідкому метанолі через знижений температурно-енергетичний рівень вихлопних газів. Найбільше зростання економічності (на 14%) спостерігалось при 1250 хв^{-1} та температурі вихлопних газів 400°C , що пояснюється оптимальним балансом між споживаною реактором тепловою енергією та енергією теплоносія.

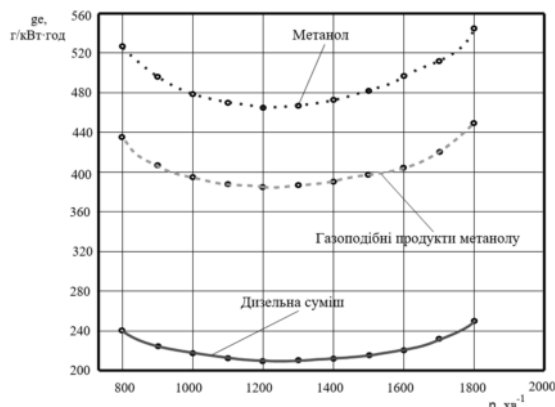


Рисунок 5 – Експериментально отримані значення споживання палива при роботі двигуна в залежності від його обертів (n) при застосуванні метанолу в різних станах та дизельного палива
Джерело: розроблено на підставі [7].

Дослідження виявили, що при температурі вихлопних газів яка підводиться до реактор становить вище 400°C , робота реактора, зокрема за вмістом водню, досягає максимуму, що суттєво підвищує ефективність робочого циклу. Покращення економічних показників дизельного двигуна з термохімічною утилізацією тепла при роботі на водневомісному паливі зумовлене як частковою утилізацією тепла вихлопних газів, так і покращенням кінетики згоряння в присутності водню.

Висновки. Пропонована конверсійна система, ключовим елементом якої є компактний та простий у встановленні термохімічний реактор, може бути застосована до будь-яких серійних дизельних двигунів. Експериментальні дослідження двигуна D21A1 показали переваги використання газоподібних продуктів метанолу, які забезпечують зростання ефективної потужності на 14% порівняно з дизельним паливом, хоча й супроводжуються збільшенням питомої витрати палива на 81-85%. Використання чистого метанолу призводить до зниження потужності та ще більшого зростання витрати палива. Важливим є те, що розроблені системи відкривають можливості для комплексної оптимізації характеристик двигунів, включаючи утилізацію відхідного тепла, покращення згоряння та екологічності, а також забезпечують перехід на альтернативні палива з відновлюваних джерел, сприяючи таким чином ресурсозбереженню. Будь-який серійний дизельний двигун, як новий, так і той, що вже експлуатується, може бути використаний як базовий для цієї системи. Її ключовий елемент це термохімічний реактор – який має просту конструкцію теплообмінника та розміри звичайного глушника, що забезпечує легкість встановлення у випускную систему двигуна.

Експериментальні дослідження дизельного двигуна D21A1, що був переобладнаний для роботи на різних видах палива – суміш дизельного палива, метанол як паливо та газоподібні продукти метанолу – виявили значні зміни в ефективній потужності. Зокрема, при використанні метанолу (співвідношення 1:6,45 з повітрям) спостерігалось зниження потужності на 5% порівняно з дизельним паливом. Однак, при застосуванні газоподібних продуктів метанолу (аналогічне співвідношення

з повітрям), потужність двигуна зросла на 14% відносно його роботи на дизелі. Ці зміни були зафіксовані в усьому діапазоні робочих обертів двигуна.

Зроблені дослідження споживання палива показали, що від обертів дизельного двигуна Д21А1, який використовує дизельне паливо, метанол та газоподібні продукти метанолу було виявлено, що витрата двигуна, що працює на продуктах перетворення метанолу, у порівнянні з дизельним паливом, зросло на 81-85 %; питома витрата палива двигуна, який використовує метанол як палива, у порівнянні з дизельним паливом, зросло на 116-120 %.

Список літератури

1. Криштопа С. І., Криштопа Л. І., Микитій І. М., Гнип М. М., Козак Ф. В. Підвищення економічних показників дизельних двигунів шляхом їхнього переведення на газоподібні продукти конверсії метилового спирту. *Нові рішення у сучасній техніці та технологіях*. 2021. № 1 (35). С. 67–80.
2. Денисюк С. П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. Вип. 2. С. 7–22.
3. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С. Техніко-економічні аспекти конвертації дизелів у газові двигуни. *Вісник СХУ імені В. Даля*. 2004. Вип. 7 (77). С. 114–117.
4. Криштопа С. І., Криштопа Л. І., Микитій І. М., Гнип М. М., Козак Ф. В. Покращення екологічних параметрів дизельних двигунів при їхньому переведенні на продукти конверсії метанолу. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. № 1 (16). С. 91–105.
5. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С. Техніко-економічні аспекти конвертації дизелів у газові двигуни. *Вісник СХУ імені В. Даля*. 2004. Вип. 7 (77). С. 114–117.
6. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С., Матейчик В. П. Дослідження можливості конвертації дизеля в газовий двигун. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.* 2003. Вип. 13. С. 125–129.
7. Микитій І. М. Покращення енергоефективності силових приводів підіймальних установок для ремонту свердловин : дис. ... д-ра філософії : 133 «Галузеве машинобудування». Івано-Франківськ, 2025. 249 с.

References

1. Kryshchop, S. I., Kryshchop, L. I., Mykytii, I. M., Hnyp, M. M., & Kozak, F. V. (2021). *Improving the economic performance of diesel engines by converting them to gaseous products of methanol conversion*. *New Solutions in Modern Engineering and Technology*, 1(35), 67–80 [in Ukrainian].
2. Denysiuk, S. P. (2013). *Formation of energy efficiency policy – modern challenges and European guidelines*. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, (2), 7–22 [in Ukrainian].
3. Zakharchuk, V. I., Sitovskiy, O. P., & Kozachuk, I. S. (2004). *Technical and economic aspects of diesel conversion into gas engines*. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 7(77), 114–117 [in Ukrainian].
4. Kryshchop, S. I., Kryshchop, L. I., Mykytii, I. M., Hnyp, M. M., & Kozak, F. V. (2021). *Improving the environmental parameters of diesel engines when converted to methanol conversion products*. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(16), 91–105 [in Ukrainian].
5. Zakharchuk, V. I., Sitovskiy, O. P., Kozachuk, I. S., & Mateichyk, V. P. (2003). *Study of the possibility of converting a diesel engine into a gas engine*. *Scientific Notes: Interuniversity Collection*, (13), 125–129 [in Ukrainian].
6. Mykytii, I. M. (2025). *Improving the energy efficiency of power drives of lifting units for well repair* (Doctoral dissertation, specialty 133 "Industrial Engineering"). Ivano-Frankivsk [in Ukrainian].

Ivan Mykytii, PhD

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Experimental Studies on Increasing Energy Saving of Power Drives During Their Conversion to Gaseous Products of Methanol Conversion

The article presents the results of an experiment aimed at investigating the performance of a serial D21A1 diesel engine retrofitted to operate on gaseous products derived from methanol conversion as an alternative fuel. The conducted tests experimentally confirmed the feasibility and potential benefits of converting diesel engines to operate on methanol-derived fuels. To assess the impact of various factors on improving fuel efficiency, a series of experiments was carried out using a methanol conversion reactor. The results demonstrated that thermochemical utilization of heat reduced fuel consumption by 6–8%, while optimization of the engine's working process provided an additional fuel saving of approximately 4–6%. For a more in-depth analysis of the factors contributing to improved fuel economy, further experimental studies were conducted. These confirmed the advantages of using gaseous products from methanol conversion, which led to a 14% increase in effective engine power compared to conventional diesel fuel, albeit with a slight increase in fuel consumption. Considering that the average cost of methanol is only 10–20% of the price of diesel fuel, converting diesel engines to operate on methanol conversion products proves to be economically advantageous.

energy saving, diesel engine, efficient power, alternative fuel, methyl alcohol, exhaust gases

Одержано (Received) 19.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 13.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 631.362

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.245-252](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.245-252)

Д. С. Неделський, Д. І. Петренко, доц., канд. техн. наук,
С. М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, О. М. Васильковський, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com

Мехатронний аналіз роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей

За результатами проведеного аналізу результатів наукових досліджень в сфері післязбиральної обробки зернових сумішей виявлено, що на сьогодні питання функціонування пневмогравітаційних сепараторів зернових сумішей недостатньо вивчено. Зокрема відсутній мехатронний аналіз роботи даного типу сепараторів з запровадженням системи автоматичного коригування системи, що не дозволяє реалізувати принцип самоадаптації пневмогравітаційної системи до змінних умов процесу пневмосепарації зернових сумішей. З врахуванням цього, в роботі розглянуто мехатронну модель пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей з елементами автоматизації контролю та автокоригуванням процесу очищення зернових культур на основі спроектованого алгоритму його функціонування.

мехатроніка, аналіз, пневмогравітаційний сепаратор, післязбиральна обробка, алгоритм

Постановка проблеми. Одним з найважливіших процесів післязбирального обробітку зернових сумішей, який створює передумови подальшого використання чи зберігання, є сепарація за комплексом фізико-механічних або технологічних властивостей. Як відомо [1, 3, 4], найбільш універсальними фізико-механічними властивостями, за якими можливий поділ зернової суміші на компоненти, є розмірні параметри та аеродинамічні властивості. І, як показує практика використання зерноочисного обладнання, сепарація за аеродинамічними ознаками застосовується на всіх етапах післязбиральної обробки [1, 3].

Відповідно, на сьогоднішній день розроблено, досліджено і введено в експлуатацію досить широкий спектр пневмосепараторів і як самостійний клас машин, і в складі комбінованих зерноочисних машин [1-4, 7]. Однак, існуючі конструктивні схеми не дозволяють отримати необхідну якість процесу при забезпеченні продуктивності на рівні решітних машин [3], що пов'язано зокрема і з неможливістю адаптації пневмосепаруючих систем до змінних умов процесу, серед яких стан і фізико-механічні властивості компонентів зерноsumіші, а це зменшує ефективність їх застосування. Тому постає необхідність пошуку нових шляхів розвитку зерноочисної техніки повітряного типу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Загальновідомі типи пневмосепараторів дослідники класифікують за типом пневмоканалу (вертикальний, горизонтальний, похилий, криволінійний, загзагоподібний тощо) та формою його перерізу (прямокутна, кругла, кільцева і т. ін.), способом взаємодії зерноsumіші з повітряним потоком (так звані способи «зважування» і «відхилення») і методом завантаження до повітряного каналу (одно- чи багаторівневий, струменями, під кутом до напрямку дії повітряного потоку тощо) [1, 3, 8]. Основна ідея створення «ідеального» пневмосепаратора – забезпечення рівномірного завантаження зерноsumіші та створення ідентичних умов взаємодії з рівномірним за швидкісним полем потоком повітря.

Одним з прикладів спроби створити найбільш оптимальний за цими параметрами

сепаратор є зерноочисна машина пневмогравітаційного типу [5, 9], в якій реалізовано принцип комбінованої дії сил інерції і повітряного потоку на зернову суміш.

В загальному випадку рух компонентів зерноsumіші в даному сепараторі на початковому етапі відбувається за загальновідомими законами вільного падіння тіла з початковою швидкістю V_0 [1, 3, 6]:

$$V = V_0 + g \cdot t,$$

де g – значення прискорення вільного падіння;

t – час, протягом якого відбувається вільне падіння.

При цьому, вільному падінню компонентів зерноsumіші перешкоджає аеродинамічний опір середовища, сила якого, як відомо [1, 3], визначається залежністю

$$P_0 = m \cdot k_v \cdot V_a^2,$$

де m – маса компонента;

k_v – коефіцієнт парусності;

V_a – величина абсолютної швидкості компоненту.

В зоні розміщення жалюзійних повітрозабірників, які розташовані на висоті H від місця подачі, на зерноsumіш починає діяти сила повітряного потоку R , яка зміщує траєкторії компонентів зерноsumіші залежно від їх аеродинамічних властивостей [1, 3]:

$$R = m \cdot k_v \cdot (V_a - U \cdot \cos \alpha)^2$$

де U – швидкість повітряного потоку;

α – кут, під яким повітряний потік діє на компонент.

Таким чином, аналіз наукових досліджень закономірностей переміщення зернової суміші під дією повітряного потоку дозволив встановити, що основні принципи визначення теоретичних властивостей поведінки компонентів зерноsumіші як окремих часток під дією фізичних сил вже відомі. Але постає необхідність розглядати компоненти не лише як одиничні частки, а як систему, яка взаємодіє з оточуючим середовищем та іншими системами. Більшість методів засновано на дослідженні зміщення точок (часток), які характеризуються відповідними властивостями, відносно їх початкового положення під дією зовнішніх сил [1-4]. Тут значно ускладнюється точність розрахунків аналітичним методом через початкове випадкове положення частинок відносно робочих органів машини.

Іншим питанням, що потребує вирішення, є необхідність запровадження системи автокоригування системи при зміні умов функціонування. Відомі спроби запровадити автоматизовану систему приводу заслінок для забезпечення прямого рівномірного розподілу швидкості подачі повітря [2], проте даний метод автокоригування носить одиничний характер та не володіє системністю вирішення задач адаптування зерноочисної системи.

Натомість, на сьогодні вже гостро постало питання застосування системного підходу до автокоригування техніко-технологічних систем, які використовуються в агропромисловому виробництві, що, як підтверджують автори [3, 5-7], можливо реалізувати при використанні мехатронних підходів при побудові і дослідженні даних систем.

Постановка завдання. Дослідження технологічного процесу та обґрунтування параметрів сепаратора з вертикальним каналом пневмогравітаційного типу для

очищення та сортування зернових сумішей з використанням мехатронних систем для забезпечення автокоригування процесу.

Виклад основного матеріалу. Пневмогравітаційний сепаратор [9] призначений для розділення зернових сумішей на компоненти за аеродинамічними властивостями з використанням повітряного потоку. Основними робочими елементами сепаратора (рис. 2) є система завантаження, вертикальний канал пневмогравітаційного типу з розміщеними на висоті H жалюзі, повітрязабірник, система створення повітряного потоку та видалення (осадження) легких компонентів (домішок).

У вертикальному повітряно-гравітаційному каналі створюються умови попереднього розшарування і розподілення компонентів зернової суміші під час переміщення за рахунок взаємодії сил гравітації та аеродинамічного опору середовища. Це дозволяє отримати в зоні жалюзі, де діє структурований повітряний потік, підвищення ефективності відбору легкого компонента із загальної маси.

Як зазначалось, поведінка компонентів зернової суміші в даній системі досить досліджена і постає питання автокерування системами, які дозволять зменшити потребу втручання оператора в контроль над процесом сепарації. Відповідно до мехатронного підходу, весь контроль необхідно перекласти на системи, серед яких блок керування, який, отримавши дані від датчиків, розміщених в ключових точках контролю, аналізує в онлайн режимі надіслані дані та надсилає коригуючі (виконавчі) сигнали на робочі елементи керування. Серед найчастіше застосовуваних елементів керування відомі крокові серводвигуни, сервоприводи тощо, або елементи взаємодії з оператором, серед яких сигнальні лампи, екранні модулі тощо, задачами яких є інформування оператора про протікання процесу сепарації [7, 10, 11].

Найскладнішими елементами мехатронного модулю є процеси налагодження програмного модуля блоку керування, який використовується для обробки даних, передачі та обробки отриманих даних від датчиків, вибір датчиків та їх калібрування відповідно до реальних умов експлуатації, оскільки одержані результати замірів матимуть прямий вплив на точність показників, які надходять для інтерпретації до блоку програмного контролю. Важливим елементом є і обґрунтування місця розміщення датчиків, яке повинно відповідати умові точного і вчасного вимірювання параметрів, які впливають на процес сепарації. Вимогою до робочих елементів керування є відповідність кроку регулювання заданому діапазону та точність виконання рухів.

Таким чином, першочерговим кроком при проектуванні мехатронної системи сепаратора є розробка блок-схеми алгоритму його роботи (рис. 1), яка характеризує послідовність процесу, що дозволить обґрунтувати фактори впливу на процес сепарації та визначити точки контролю в системі. В даному випадку серед факторів впливу слід виділити, в першу чергу, параметри повітряного потоку та параметри вхідного матеріалу (тип зернової суміші, її вологість).

Для забезпечення точного контролю за процесом сепарації та автоматичного коригування параметрів системи доцільним є використання систем автоматизації процесів, зокрема щодо контролю потужності приводу вентилятора, швидкості повітряного потоку в зоні сепарації, подачі зернової суміші до зони сепарації.

Враховуючи розроблений алгоритм (рис. 1), проектуємо мехатронну систему пневмогравітаційного сепаратора (рис. 2), де наведено розташування елементів керування та датчиків системи контролю за процесом пневмогравітаційної сепарації.

Подача зернової суміші починається з бункера, де розташовано активний крильчатий живильник, оснащений датчиком частоти обертання, який задає контрольований потік зернової суміші відповідно заданим параметрам. В якості

виконавчого елемента, який забезпечить автоматизацію процесу точного коригування подачі, пропонується використати кроковий серводвигун LeadShine 3DM580S [10, 11], що має рух штока навколо своєї осі з заданою частотою обертів в діапазоні $5 \dots 100 \text{ хв}^{-1}$, а напруга живлення становить 12 В. Досить важливим є контроль вхідної вологості зернової суміші, тому в бункері варто встановити звичайний універсальний врізний цифровий датчик вологи (н-д гігрометр ХН-В403 [10]), який дозволяє через мікроконтролер виводити на інформаційний LCD дисплей блоку керування дані про рівень загальної вологості зернової суміші у відсотковому еквіваленті. Він також має напругу живлення 12 В.

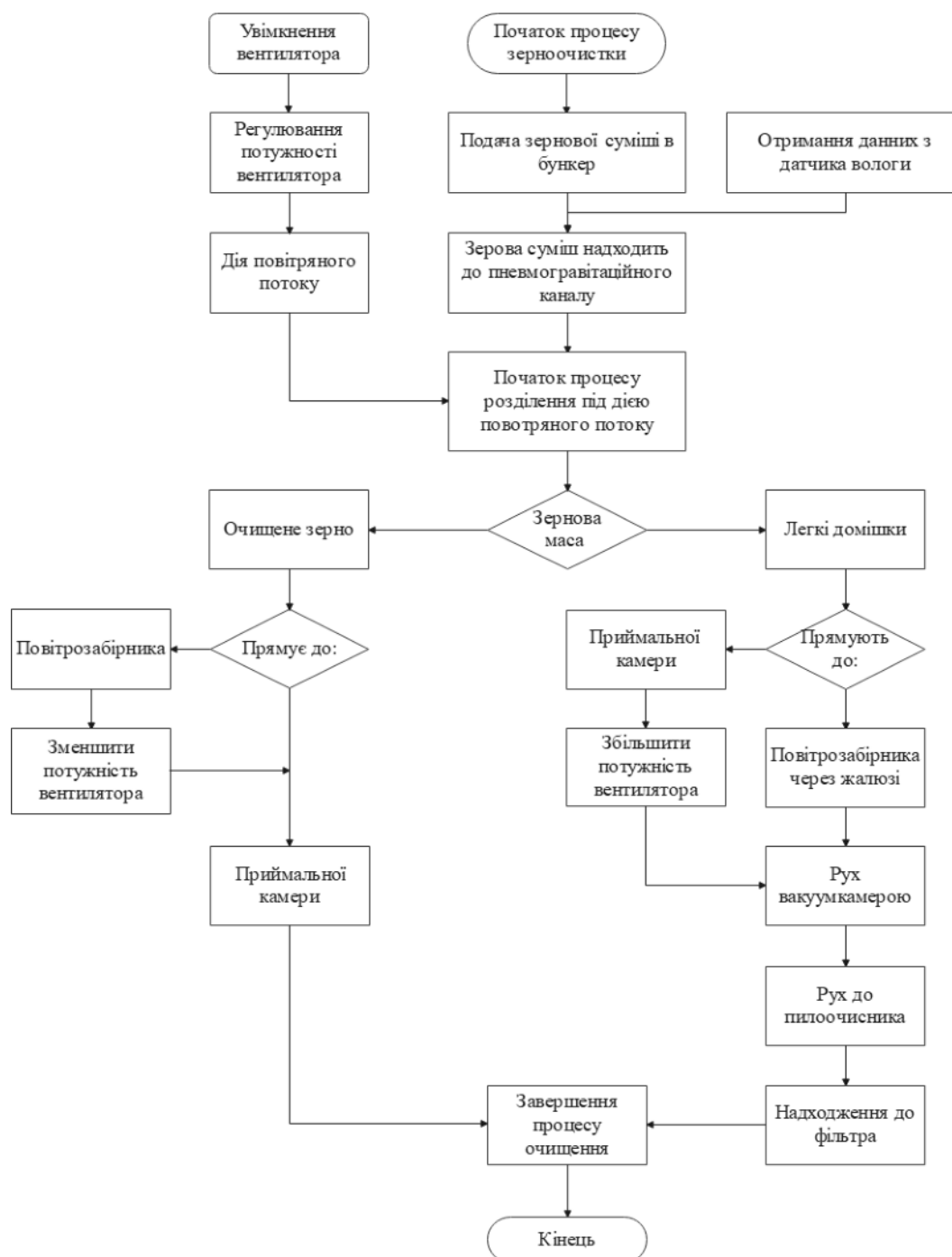


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму роботи пневмогравітаційного сепаратора
Джерело: розроблено авторами

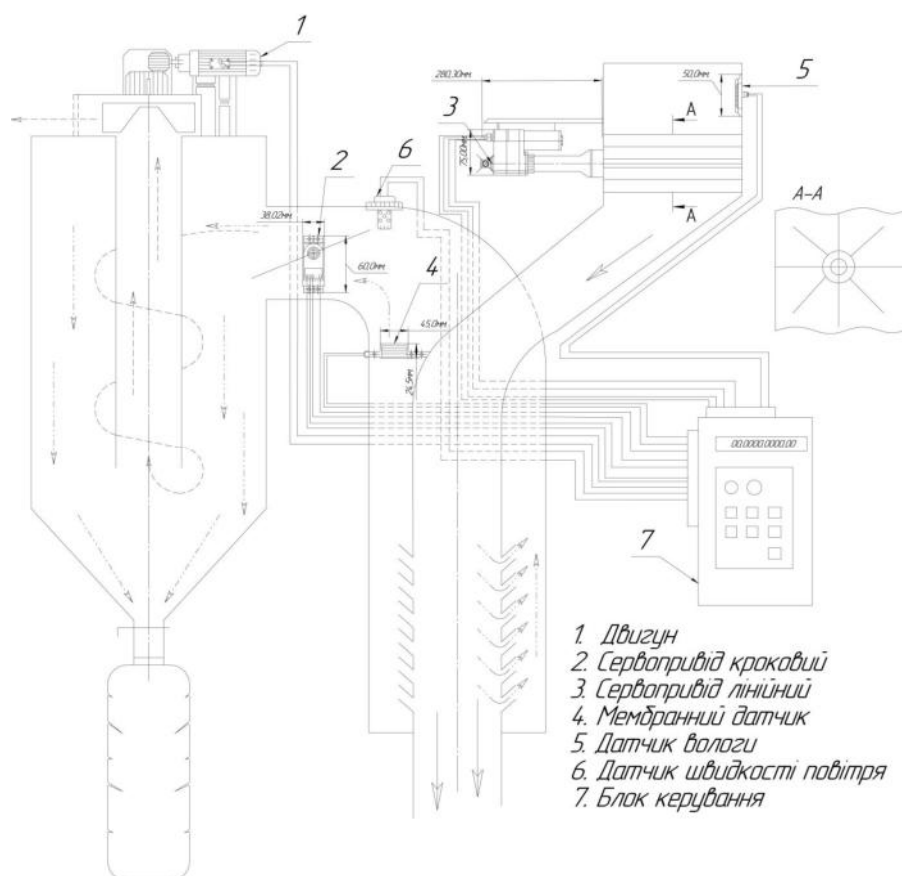


Рисунок 2 – Схема пневмогравітаційного сепаратора

Джерело: розроблено авторами на підставі [9]

В пневмогравітаційному каналі для забезпечення керування швидкістю повітряного потоку необхідно встановити заслінку, для керування якою пропонується використати сервопривод звичайного типу SERVO-MG995-360 [11, 12], в якому вал обертається навколо своєї осі з заданим кроком. Даний сервопривод має діапазон напруги живлення 4,8...7,2 В, що дозволяє забезпечити зусилля на валу в межах 9 кг/см (при напрузі 4,8 В)...12 кг/см (при напрузі 6 В). Кут повороту валу при цьому становить 360°, а керування відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції, що дозволяє точно контролювати кут відкриття заслінки з швидкістю повороту валу 60°/0,13 сек.

Сервопривод, який задає точне положення заслінки регулювання швидкості повітряного потоку, отримує сигнали від блоку керування, а дані для відповідного коригування надходять від датчиків, розміщених у вакуум-камері. Дані з датчиків надходять до блоку керування, де відповідно до програми розраховується кут зсуву валу крокового двигуна відносно початкового положення, та надсилається коригуючий сигнал.

Показниками якості сепарації є рівень чистоти матеріалу на виході та втрати основної фракції у відходах. Основною з задач є мінімізація втрат зерна через вакуумкамеру, що залежить від точного регулювання швидкості повітряного потоку, і які можливо проконтролювати, виходячи з даних про кількість зерна, яке проходить через вакуумкамеру. Такі дані можна отримати за допомогою перетворювача каналу зусилля [10-12]. Даний вимірювальний пристрій представляє собою сукупність елементів, таких, як тензорезисторний сенсор зусилля, вимірювальний підсилювач та аналогово-цифровий перетворювач. Сенсор зусилля являє собою прилад з чутливим до деформації елементом у вигляді сапфірової мембрани з кремнієвими тензорезисторами. Механічне зусилля чинить тиск на мембрану від чого вона деформується, змінюючи

опір схеми тензорезисторів, що призводить до зміни вихідної напруги. Перевагою такого сенсора є його висока чутливість та здатність точно відтворити імпульси впливу на мембрану та його пило-вологозахист. Також він є нечутливий до вібрацій та ударів об корпус і його компоненти можуть бути використані в сепараторі.

Основною його задачею є чутливість до появи зернових часток в повітряному потоці вакуумкамери, при цьому реакція на повітряний потік, пилові частки і легкі домішки повинна бути відсутня. Механічного впливу легких домішок не достатньо для значної деформації мембрани, тобто вона є мінімальною, через що вихідний сигнал відсутній. А ось зерно, яке потрапило до вакуумкамери, взаємодіє з сенсором, це спричиняє суттєве відхилення мембрани на величину, яка у 8 раз може перевищувати вплив домішок, що зумовлено вагою зерна та його прискоренням, отже цієї величини деформації достатньо для появи імпульсу на виході (рис. 3).

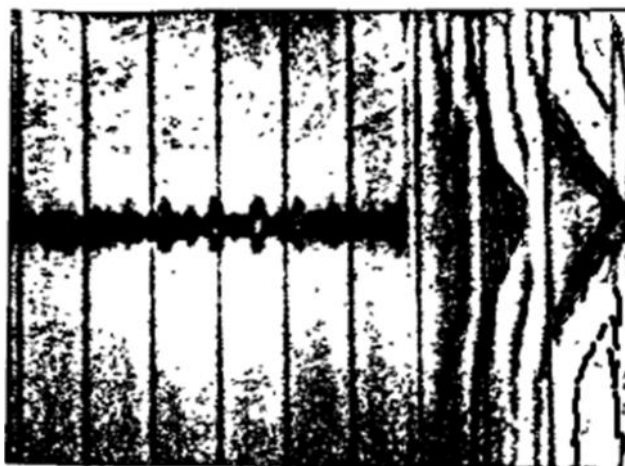


Рисунок 3 – Осцилограма сигналів вимірювального підсилювача при потрапінні на мембрану зернівки

Джерело: розроблено на підставі [12]

Контроль точності регулювання швидкості повітряного потоку пропонується здійснювати за допомогою датчика швидкості повітряного потоку (н-д 641-6 [10-12]), розташованого в патрубку вакуумкамери.

Отримані дані з усіх датчиків передаються на блок керування, де програмним методом розрахунку буде здійснюватися контроль над передачею імпульсів на приводи регулювання заслінками для забезпечення оптимальної швидкості подачі зернової маси і контролю якості очищення.

Висновки. 1. Проведений аналіз наукових досліджень підтвердив недостатній рівень вивчення мехатронного підходу до автоматизації пневмогравітаційних сепараторів зернових сумішей, що стримує реалізацію принципу самоадаптації системи до змінних умов процесу очищення зернових матеріалів від домішок.

2. Розроблено алгоритм функціонування пневмогравітаційного сепаратора з урахуванням мехатронного підходу, який передбачає автоматичний контроль і коригування параметрів роботи пневмогравітаційного сепаратора у режимі реального часу на основі даних від датчиків.

3. Запропонована конструкція мехатронної системи включає:

– датчик вологості в бункері завантаження, діапазон вимірювання якого становить 0...99%, що дозволяє корегувати ступінь завантаження пневмогравітаційного каналу з точністю до 5%;

– датчик частоти обертання активного живильника, який забезпечує контроль кута відкриття заслінки регулювання швидкості повітряного потоку з швидкістю повороту валу $60^\circ/0,13$ сек. і працює в парі з сервоприводом регулювання заслінки швидкості повітряного потоку, що забезпечує зусилля на валу в межах 9...12 кг/см, яке дозволяє змінювати продуктивність завантаження з точністю до 8%.

– тензорезисторний сенсор зусилля для контролю втрат основної фракції, який в тандемі з датчиком швидкості повітряного потоку у вакуумкамері забезпечує точність регулювання заслінки у вакуумкамері до 0,2%.

4. Використання сервоприводів та крокових двигунів у системі дозволяє здійснювати точність регулювання питомої подачі матеріалу в діапазоні 0,1...0,8 кг/дм³·год при вторинному очищенні та параметрів і режимів руху повітряного потоку в діапазоні до 0,5 м/с, що підвищує ефективність виділення домішок на 14% і зменшує втрати повноцінного зерна на 30%.

5. Запропонована мехатронна система пневмогравітаційного сепаратора дозволяє забезпечити підвищення продуктивності та енергоефективності процесу післязбиральної обробки зерна, а також може бути основою для створення адаптивних зерноочисних машин нового покоління.

Список літератури

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
2. Алієв Е. Б., Гаврильченко О. С. Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насінневого матеріалу. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві. Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. 2019. Вип. 201. С. 132–140.
3. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 2020. 362 с.
4. Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна / Васильковський О.М. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 104-110. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110>.
5. Недельський Д.С., Петренко Д.І. Мехатронні принципи керування зерноочисними сепараторами. *Вісник Степу. Науковий збірник ІСГС НААН*. Вип. 22. Вінниця : НПЛАН-ЛТД, 2025. С. 84-86.
6. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
7. Aliiev E. Lupko K. Kobets O. Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*. 2023. 16 (65), 1. P. 103–126. DOI: 10.31926/but.fwi.2023.16.65.1.8.
8. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький : ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 111-116. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116>.
9. Пневмогравітаційний сепаратор : пат. 153219 Україна : МПК В07В 4/02 (2006.01), В07В 7/01 (2006.01). № у 202203732 ; заявл. 05.10.2022 ; опубл. 07.06.2023, Бюл. № 23/2023.
10. Вимірювальні перетворювачі : лабораторний практикум / В. Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов, О.Г. Ігнатенко, В.С. Маньковська. Вінниця: ВНТУ, 2013. 183 с.
11. Мехатроніка : підручник / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, В.В. Крушельницький. К.: ЦП „Компрінт”, 2020. 404 с.
12. Яхно О.М., Узунов О.В., Луговський О.Ф. та ін. Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 711 с.

References

1. Kotov, B. I., et al. (2017). *Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest grain processing and storage (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling): Collective monograph*.

- National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, National Scientific Center “Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture”. Kyiv; Nizhyn: Lysenko M. M. Publishing [in Ukrainian].
2. Aliiev, E. B., & Havrylchenko, O. S. (2019). *Justification of an automated air flow control system in an aerodynamic seed separator. Modern Problems of Improving Technical Systems and Technologies in Animal Husbandry. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko*, (201), 132–140 [in Ukrainian].
 3. Stepanenko, S. P. (2020). *Mechanical and technological substantiation of processes and equipment for sieve-free fractionation of grain materials* (Doctoral dissertation). Hlevakha [in Ukrainian].
 4. Vasylykovskiy, O. M., et al. (2021). *Justification of the design scheme of a pneumatic-sieve grain separator. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (51), 104–110. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110> [in Ukrainian].
 5. Niedelskyi, D. S., & Petrenko, D. I. (2025). *Mechatronic principles of controlling grain-cleaning separators. Steppe Bulletin. Scientific Collection of ISGS NAAS*, (22), 84–86 [in Ukrainian].
 6. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes: Textbook*. Kyiv: Agrarian Science. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in Ukrainian].
 7. Aliiev, E., Lupko, K., & Kobets, O. (2023). Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 16(65/1), 103–126. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8>
 8. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylykovskiy, O. M., & Petrenko, D. I. (2021). *Evaluation of uniformity of distribution and contamination of grain during its multilevel introduction into the pneumatic-separating channel. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (51), 111–116. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116> [in Ukrainian].
 9. *Pneumogravitational separator*: Patent 153219 Ukraine: IPC B07B 4/02 (2006.01), B07B 7/01 (2006.01). No. u 202203732; filed 05.10.2022; published 07.06.2023, Bulletin No. 23/2023 [in Ukrainian].
 10. Kucheruk, V. Yu., Sevastyanov, V. M., Ihnatenko, O. H., & Mankovska, V. S. (2013). *Measuring transducers: Laboratory workshop*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
 11. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O., & Krushelnyskyi, V. V. (2020). *Mechatronics: Textbook*. Kyiv: CP Komprint [in Ukrainian].
 12. Yakhno, O. M., Uzunov, O. V., Luhovskyi, O. F., et al. (2017). *Applied hydroaeromechanics and mechatronics: Textbook*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].

Dmytro Nedelsky, Dmytro Petrenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylykovsky**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mechatronic Analysis the Operation of a Pneumogravity Separator for Grain Mixtures

The analysis of the results of scientific research in the field of post-harvest processing of grain mixtures revealed that today the issue of the functioning of pneumogravity separators of grain mixtures has not been sufficiently studied. In particular, there is no mechatronic analysis of the operation of this type of separators with the introduction of an automatic correction system of the system, which does not allow implementing the principle of self-adaptation of the pneumogravity system to the changing conditions of the process of pneumoseparation of grain mixtures. Taking this into account, the work considers a mechatronic model of a pneumogravity separator of grain mixtures with elements of automation of control and auto-correction of the process of cleaning grain crops based on the designed algorithm of its functioning.

Analytical studies are presented that formed the basis for the development and characteristics of the mechatronic system of a pneumogravity separator. The key element of the system is the built-in auto-correction system of the process of cleaning the grain mixture, which ensures increased efficiency. For a better understanding of the functioning, a block diagram of the separator operation has been developed, which details the stages of separation from loading the grain mass to obtaining cleaned grain. A scheme for receiving and processing data from sensors in the system control unit is also presented. The proposed algorithm for designing mechatronic systems using the example of a pneumatic-gravity separator allows significantly increasing the efficiency of pneumatic grain separation due to continuous monitoring of process indicators, data analysis, and automatic adjustment of set parameters in real time.

mechatronics, analysis, pneumogravity separator, post-harvest processing, algorithm

Одержано (Received) 16.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 004.94:631.372:004.9

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.253-264](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.253-264)**О. І. Фількін, А. М. Тригуба**, проф., д-р техн. наук*Національний природничий університет України, м. Львів, Україна**e-mail: filkin.orest@gmail.com, trianamik@gmail.com*

Цифровий двійник кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки

Метою статті є розроблення функціональної архітектури цифрового двійника як складової кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки з урахуванням реального стану об'єкта очищення. Основну увагу приділено забезпеченню адаптивного керування процесом миття на основі актуальних сенсорних даних і прогнозуванню параметрів очищення для підвищення енергоефективності, економії ресурсів і зменшення навантаження на операторів.

У межах дослідження побудовано функціональну схему взаємодії основних рівнів системи – фізичного, сенсорного, керування (PLC), диспетчерського (SCADA) та рівня цифрового двійника. Запропонована математична модель базується на оцінці ступеня забруднення поверхонь, розмірів техніки, температури й тиску в системі. На основі цих параметрів формується вектор ознак, що надходить у прогнозну модель, яка забезпечує визначення тривалості очищення й формування керуючих впливів на виконавчі механізми. У комп'ютерній реалізації модель формалізується у вигляді програмного модуля з трьома основними підсистемами – модуль обробки вхідних даних, модуль чисельного інтегрування рівнянь і модуль адаптивної логіки. Для вибору оптимального часу завершення циклу миття сільськогосподарської техніки запропоновано використовувати неймережевий модуль, який забезпечує прогнозування тривалості миття, завдяки навченій моделі на історичних даних.

Результати дослідження підтверджують доцільність використання цифрового двійника в складі кіберфізичної системи для миття сільськогосподарської техніки. Застосування прогнозної моделі дозволяє адаптувати процес миття до реальних умов, зменшуючи витрати води, електроенергії та миючих засобів. Представлений підхід сприятиме переходу від традиційних технологій до інтелектуалізованих рішень, інтегрованих у цифрову виробничу інфраструктуру. Це сприяє впровадженню принципів Індустрії 4.0 у вітчизняне машинобудування.

цифровий двійник, кіберфізична система, технологія, машинобудування, мийка техніки, SCADA, прогнозування, математичне моделювання, інтелектуальне управління, штучна нейронна мережа

Постановка проблеми. Підвищення ефективності обслуговування сільськогосподарської техніки є одним із основних напрямів розвитку аграрної інженерії в умовах цифровізації виробничих процесів. Впродовж останніх десятиліть зросли вимоги до якості очищення машин після експлуатації у польових умовах. Це обумовлено не лише санітарно-гігієнічними та екологічними стандартами, але й потребою у збереженні довговічності техніки та зниженні експлуатаційних витрат [1-3]. Водночас, у більшості господарств процес миття сільськогосподарської техніки залишається ручним або напівавтоматизованим, характеризується високим споживанням ресурсів і низькою адаптивністю до умов забруднення.

З огляду на інтенсивність забруднення, яке залежить від типу ґрунту, погодних умов, інтенсивності експлуатації, виникає потреба у створенні систем, здатних до самостійної оцінки стану техніки, оптимізації витрат води, миючих засобів і часу миття. Саме в цьому контексті актуальним є впровадження кіберфізичних систем (КФС) та розробка цифрових двійників, які дозволяють моделювати реальний процес миття в режимі реального часу, відслідковувати зміну параметрів об'єкта та забезпечувати адаптивне управління технологічним циклом.

Проблема полягає в тому, що більшість існуючих систем автоматизації обмежуються жорстко заданими сценаріями очищення, без урахування фактичного рівня забруднення або ефективності попередніх циклів [4,5]. Окрім того, в наявних рішеннях відсутній

гнучкий зв'язок між сенсорними даними, обчислювальними модулями та виконавчими механізмами, що унеможливорює адаптацію до нестандартних умов або зміни параметрів миття на основі прогнозу.

У зв'язку з цим існує науково-практичне завдання, яке стосується розробки цифрового двійника КФС миття сільськогосподарської техніки, що поєднує засоби сенсорного моніторингу, моделювання рівня забруднення, адаптивного управління і візуалізації технологічного процесу, забезпечуючи цілісну інтеграцію фізичного та віртуального середовищ. Такий підхід має на меті не лише автоматизацію, але й інтелектуалізацію процесу очищення з урахуванням принципів сталого використання ресурсів та вимог Індустрії 4.0.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття зростає науковий інтерес до цифрових двійників як інструменту візуалізації, моделювання та управління технічними системами у виробничому середовищі. У роботах окремих дослідників зазначено, що застосування цифрових двійників у поєднанні з КФС дозволяє досягти підвищення ефективності управління технологічними процесами. Зокрема, завдяки можливості аналізу даних у реальному часі та швидкому реагуванню на зміни у зовнішньому середовищі [6-7].

Розвиток технологій цифрового моделювання та впровадження КФС суттєво трансформували підходи до управління технічними процесами в машинобудуванні. Окрему нішу в цьому контексті займає створення цифрових двійників – математично описаних моделей, які дозволяють відтворювати поведінку фізичних об'єктів у цифровому середовищі в режимі реального часу [8].

У машинобудівній галузі цифрові двійники знаходять застосування у проектуванні, моніторингу та оптимізації роботи складних систем. При цьому на рівні практичної реалізації переважають рішення, орієнтовані на контроль за виробничими лініями, роботизованими платформами або окремими верстатами. Зокрема, у дослідженні [9] описано архітектуру КФС для підприємств нового покоління, яка включає в себе багаторівневу обробку даних, сенсорну взаємодію з об'єктами та прогнозування сценаріїв відмов на основі цифрової копії процесу.

Наукові праці, присвячені промисловим застосуванням цифрових двійників, доводять ефективність їх використання у виробничих системах, де потрібне адаптивне управління на основі сенсорних даних. Зокрема, у дослідженні [10] акцентовано увагу на можливості зниження ресурсних витрат шляхом інтеграції IoT-модулів з аналітикою штучного інтелекту в межах КФС. У свою чергу, автори роботи [11] визначають цифровий двійник як ключову компоненту для реалізації концепції «розумного обслуговування» техніки.

Варто також відзначити дослідження [12], які впровадили цифрову модель для адаптивного очищення харчового обладнання на основі оптичних сенсорів, що близьке за принципом до процесів обробки агротехніки. Аналогічно, у роботі [13] реалізовано контроль параметрів промивання з динамічним налаштуванням на базі SCADA-систем. Хоча приклади повністю автоматизованого миття сільськогосподарської техніки з використанням цифрових двійників наразі поодинокі, загальні принципи вже добре сформовані в суміжних галузях.

Аналіз наукових джерел дозволяє зробити висновок, що існує методологічна та технологічна ніша у сфері очищення агротехніки, яка ще не охоплена повною мірою сучасними цифровими підходами. Розробка цифрового двійника КФС миття техніки, що поєднує сенсори, адаптивне управління, прогнозні моделі та візуалізацію процесу, є актуальним науковим завданням, яке поєднує інженерію, програмування та штучний інтелект.

Таким чином, виявлено, що більшість сучасних рішень зосереджені або на механічному мийному обладнанні, або на загальних аспектах КФС, тоді як створення цифрових двійників процесу миття сільськогосподарської техніки залишається недостатньо дослідженим. Це визначає потребу у подальшому науковому аналізі та розробці відповідної архітектури КФС із функцією адаптивного керування мийними циклами.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка цифрового двійника кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки, орієнтованого на умови функціонування смарт-агропідприємств. Такий підхід забезпечує інтеграцію процесу очищення техніки з сучасними вимогами Індустрії 4.0, зокрема цифровізацією, автоматизацією та адаптивним управлінням виробничими процесами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити два завдання:

- розробити функціональну схему архітектури цифрового двійника як складової кіберфізичної системи, з урахуванням взаємодії сенсорів, виконавчих механізмів, контролерів і SCADA-рівня;
- запропонувати математичну модель, що дозволяє в режимі реального часу прогнозувати параметри мийного процесу на основі вхідних даних про стан техніки та забезпечити адаптивне керування циклами очищення.

Реалізація цих завдань дозволить підвищити ефективність, точність і гнучкість мийних систем в аграрному виробництві.

Виклад основного матеріалу. Розроблення цифрового двійника кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки ґрунтується на побудові комплексної архітектури, що поєднує фізичну, сенсорну, обчислювальну та віртуальну компоненти. Основна ідея полягає у створенні динамічного цифрового відображення фізичного процесу очищення техніки, яке функціонує в реальному часі, отримує дані від сенсорів, реагує на зміни середовища та формує керуючі дії через контролери [14]. Одним із таких рішень є цифровий двійник, який являє собою віртуальну модель, що тісно пов'язана з фізичною системою і здатна взаємодіяти з нею в реальному часі. Його впровадження в архітектуру кіберфізичної системи миття техніки забезпечує як стабільність, так і гнучкість технологічного процесу.

Сучасні тенденції в сільськогосподарському машинобудуванні вимагають не лише удосконалення механізації основних технологічних операцій, але й запровадження елементів гнучкого цифрового управління [15-17]. Особливо це актуально для систем миття сільськогосподарської техніки, де змінні умови експлуатації, неоднорідні забруднення та необхідність економного використання ресурсів формують потребу у самонавчальній і адаптивній архітектурі. Рішенням у такому випадку виступає інтеграція цифрового двійника до складу кіберфізичної системи.

Архітектура цифрового двійника має ієрархічну структуру, в якій функціонально виділено п'ять узгоджених рівнів. Фізичний рівень складається з виконавчих пристроїв – мийної рамки з форсунками високого тиску, насосної станції, ротаційних щіток, нагрівача мийного розчину та автоматичних заслінок. Робота цих пристроїв підпорядковується керуванню за реальними параметрами. Сенсорний рівень забезпечує безперервне надходження даних від датчиків тиску, температури, витрати води, оптичних сенсорів забруднення поверхні та датчиків положення механізмів. Передача сенсорної інформації здійснюється на програмований логічний контролер (PLC), який формує керуючі впливи за встановленою логікою. Далі ці дані надходять до SCADA-рівня, що дозволяє оператору моніторити процес, реагувати на аварійні сигнали та запускати сценарії очищення. У підсумку вся інформація консолідується у цифровому двійнику – аналітичній моделі, яка не тільки відображає поточний стан системи, але й прогнозує розвиток подій, симулює динаміку процесу та оптимізує параметри в реальному часі.

На рисунку 1 подано функціональну схему архітектури цифрового двійника як складової кіберфізичної системи. Вона відображає зв'язки між компонентами, сигнальні контури та принципи зворотного зв'язку. Важливо відзначити, що взаємодія між рівнями є двосторонньою, тобто дані передаються не лише вгору (від сенсорів до двійника), а й вниз у вигляді адаптивних рішень.

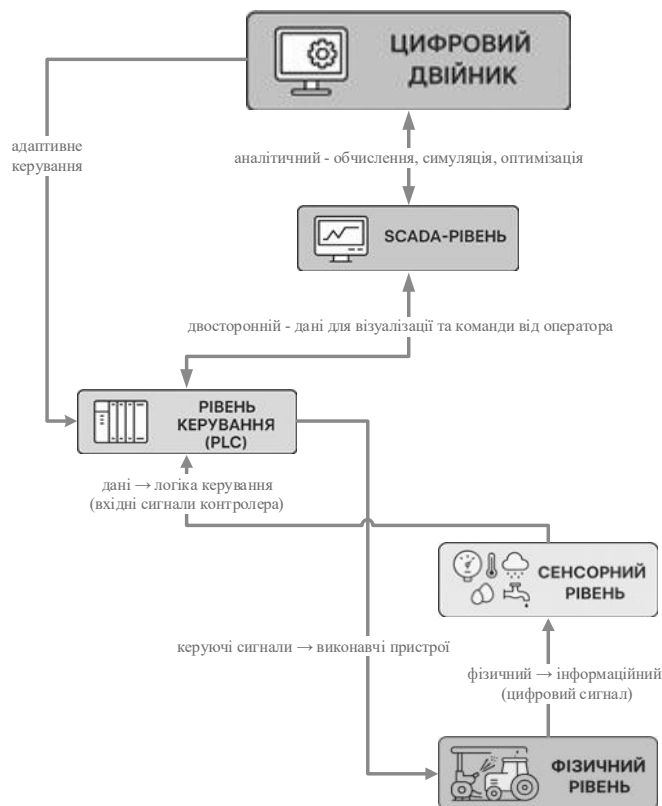


Рисунок 1 – Функціональна схема архітектури цифрового двійника у складі кіберфізичної системи миття техніки

Джерело: розроблено авторами

Формально архітектуру цифрового двійника можна подати як систему рівнянь, де кожен рівень виконує свою операцію:

– сенсорний рівень

$$x(t) = H(s(t)), \quad (1)$$

– контролер (PLC)

$$u(t) = F(x(t), \theta), \quad (2)$$

– SCADA-рівень (моніторинг, втручання)

$$v(t) = G(u(t), m(t)), \quad (3)$$

– цифровий двійник

$$y(t) = M(v(t), x(t), x^{(t)}), \quad (4)$$

де $s(t)$ – вхідні фізичні параметри (температура, тиск, забруднення); $x(t)$ – оброблені сенсорні дані; $u(t)$ – керуючі сигнали; $v(t)$ – візуалізовані параметри процесу; $x^{(t)}$ – прогнозовані цифровим двійником значення; θ – набір логічних правил у PLC; $m(t)$ – реакція оператора або алгоритм SCADA.

Цифровий двійник виконує симуляцію процесу миття сільськогосподарської техніки, визначаючи прогнозовану ефективність режиму за формулою:

$$E = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (\alpha P(t) + \beta T(t) + \gamma Z(t)) dt, \quad (5)$$

де $P(t)$ – тиск мийної рідини; $T(t)$ – температура; $Z(t)$ – коефіцієнт забруднення; α, β, γ – вагові коефіцієнти; τ – тривалість циклу.

Максимізація E із врахуванням обмежень на витрати води і енергії дозволяє визначити найефективніший сценарій миття сільськогосподарської техніки. У разі виявлення низької ефективності цифровий двійник передає рекомендації до SCADA, а звідти – до PLC, де змінюються режими миття – підвищується температура або активується ротація щіток.

Функціональна відповідальність рівнів у архітектурі цифрового двійника кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки представлена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Функціональна відповідальність рівнів у архітектурі цифрового двійника

Рівень	Основні функції	Компоненти
Фізичний	Реалізація механічного впливу	Насоси, щітки, форсунки, платформи
Сенсорний	Збір та оцифрування параметрів	Датчики тиску, температури, вологості
PLC-контролер	Виконання логіки керування	Siemens S7-1200, Omron CP1H
SCADA	Візуалізація, логування, інтерфейс людино-машинної взаємодії	WinCC, Ignition, InduSoft
Цифровий двійник	Прогнозування, симуляція, оптимізація	Python, Matlab, Simulink-моделі

Джерело: розроблено авторами

Особливу увагу слід приділити тому, як цифровий двійник враховує зворотний зв'язок. Наприклад, якщо під час миття трактора із гусеничним шасі оптичний сенсор фіксує залишкове забруднення, а тривалість циклу наближається до критичної, система може автоматично внести коригування. Це реалізується через блок симуляцій, де оцінюється гіпотетична реакція системи при збільшенні тиску на 10% або зміні температури. Модель проводить порівняння очікуваного результату зі стандартом, а у випадку невідповідності – надсилає сигнал на зміну параметрів.

Основною особливістю у цій архітектурі є те, що рішення приймається не за жорстко закладеними скриптами, а на основі змінюваних моделей, які навчаються на даних із реального циклу миття сільськогосподарської техніки. Такий підхід дозволяє зробити систему не лише керованою, але й розумною, здатною адаптуватися до нових типів забруднень, умов експлуатації техніки та навіть типу машин.

Підсумовуючи вище сказане, функціональна схема цифрового двійника у складі кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки є не лише технічно обґрунтованою, а й методологічно завершеною. Вона об'єднує механіку, електроніку, автоматизацію, програмування й аналітику у єдиний інформаційно-технологічний контур. Це дозволяє перейти від класичної автоматизації системи миття сільськогосподарської техніки до рівня інтелектуальної автономної системи.

Для реалізації адаптивного управління процесом миття сільськогосподарської техніки слід сформувати узагальнену модель, яка здатна в реальному часі враховувати вхідні параметри стану об'єкта, прогнозувати тривалість та ефективність очищення, а також динамічно змінювати режими керування. Така модель поєднує аналітичну (математичну) частину, що відображає фізичні закономірності, з обчислювальною

(комп'ютерною), яка дозволяє реалізувати обчислення на мікроконтролері або сервері зворотного зв'язку.

Вихідним елементом моделі є блок оцінки ступеня забруднення техніки, який виконується на основі даних сенсорів оптичного відбиття або термографічного сканування. Нехай Z_0 відображає нормований рівень забруднення на момент запуску системи. Він виражається у вигляді безрозмірної величини в інтервалі $[0,1]$, де 1 – максимальне забруднення. Математично ця модель має вигляд:

$$\frac{dZ}{dt} = -k_1 \cdot P(t) - k_2 \cdot T(t) + k_3 \cdot R(t), \quad (6)$$

де $Z(t)$ – залишковий ступінь забруднення; $P(t)$ – тиск подачі мийного розчину; $T(t)$ – температура води або піни; $R(t)$ – функція рециркуляції/рефлюксу (показує ступінь повторного забруднення щітки); k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти ефективності, що встановлюються експериментально.

Управління процесом передбачає досягнення порогового значення забруднення Z_{th} , при якому процес вважається завершеним. Формально умова зупинки миття сільськогосподарської техніки задається нерівністю:

$$Z(t) \leq Z_{th}, \text{ де } Z_{th} \in [0.05, 0.15]. \quad (7)$$

Математична модель адаптивного керування враховує зміну конфігурації техніки, її габарити, кутову орієнтацію, кількість коліс чи наявність гусеничного приводу. Вектор параметрів об'єкта позначимо як:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n], \quad (8)$$

де x_i – геометричні або фізичні параметри.

На основі цих параметрів формується модель обчислення витрати енергії на один цикл миття сільськогосподарської техніки:

$$E_c = \int_0^T [\alpha \cdot P^2(t) + \beta \cdot T(t)^2 + \gamma \cdot V(t)^2] dt, \quad (9)$$

де E_c – загальна витрата енергії на цикл; $V(t)$ – витрата води; α, β, γ – відповідно коефіцієнти ваги.

Структуру математичної моделі прогнозування параметрів процесу миття сільськогосподарської техніки представлено на рис. 2.

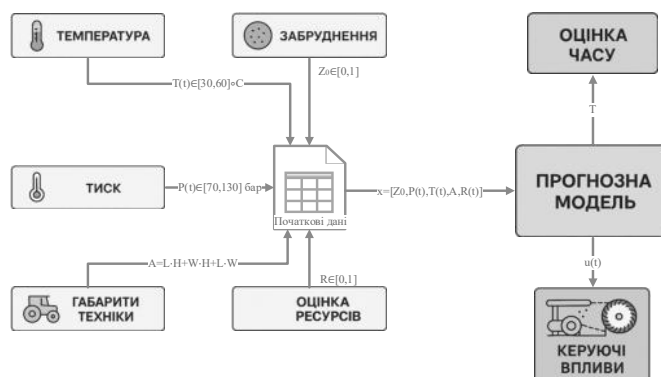


Рисунок 2 – Структура математичної моделі прогнозування параметрів процесу миття сільськогосподарської техніки

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 2 ілюструє логічно-математичну структуру моделі прогнозування параметрів процесу миття сільськогосподарської техніки в рамках КФС. Усі

компоненти взаємодіють між собою в реальному часі, формуючи єдиний інформаційно-керуючий контур на основі сенсорних даних, аналітичних моделей та систем адаптивного керування.

На нижньому рівні функціонування моделі знаходяться первинні вхідні величини, що формуються сенсорними елементами системи. Зокрема, показник забруднення техніки Z_0 розраховується на основі оптичних або спектрофотометричних характеристик поверхні згідно з виразом:

$$Z_0 = \frac{I_{em} - I_{om}}{I_{em}}, \quad Z_0 \in [0,1], \quad (10)$$

де I_{em} – інтенсивність світлового відбиття чистої поверхні; I_{om} – інтенсивність від поточної поверхні.

Параметр Z_0 є досить важливим для визначення ступеня забрудненості об'єкта очищення.

Наступною змінною є тиск водяного потоку $P(t)$, що динамічно змінюється в межах робочого діапазону:

$$P(t) \in [70,130] \text{ бар} . \quad (11)$$

Тиск водяного потоку $P(t)$ прямо впливає на ефективність механічного видалення забруднень. Аналогічно, температура води або мийного розчину $T(t)$ визначає хімічну активність миючих засобів і налаштовується в межах:

$$T(t) \in [30,60]^\circ \text{C} . \quad (12)$$

Важливою характеристикою є площа A поверхні, яку потрібно мити. Вона розраховується на основі габаритів сільськогосподарської техніки:

$$A = L \cdot H + W \cdot H + L \cdot W , \quad (13)$$

де L, W, H – відповідно довжина, ширина та висота сільськогосподарської техніки, м.

Отримане значення площі A безпосередньо впливає на прогнозовану тривалість миття сільськогосподарської техніки.

Паралельно формується показник ресурсної готовності R або інтенсивності використання витратних матеріалів (енергії, води, миючих речовин), який нормалізується у вигляді безрозмірної величини:

$$R(t) = \frac{E_{nom}}{E_{max}}, \quad R(t) \in [0,1]. \quad (14)$$

Усі зазначені вище параметри формуються у вектор ознак x , який забезпечує початкові дані для виконання прогнозування режиму миття сільськогосподарської техніки:

$$x(t) = [Z_0, P(t), T(t), A, R(t)] \quad (15)$$

Вектор ознак x передається на вхід прогновної моделі. Ця модель, реалізована у вигляді функції $f(\cdot)$, що генерує два типи вихідних сигналів. Перший це прогнозована тривалість T циклу миття сільськогосподарської техніки:

$$T = f(x) . \quad (16)$$

Тривалість T циклу миття сільськогосподарської техніки слугує орієнтиром для диспетчерської підсистеми. Другий – це керуючі впливи на виконавчі механізми (насоси, піноутворювачі, щітки тощо), що формуються у вигляді вектор-функції:

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)] = g(x(t), T). \quad (17)$$

Залежно від значення Z_0 прогнозна модель може автоматично змінювати режим миття сільськогосподарської техніки:

$$W_{\text{mode}} = \begin{cases} \text{Інтенсивний,} & Z_0 > 0,8, \\ \text{Звичайний,} & 0,4 < Z_0 \leq 0,8, \\ \text{Швидкий,} & Z_0 \leq 0,4. \end{cases} \quad (18)$$

Таким чином, запропонована схема забезпечує замкнутий контур управління, в якому зібрані дані формують обґрунтовані дії з миття, орієнтовані на поточний стан об'єкта (сільськогосподарської техніки) і ресурсні обмеження системи. В результаті досягається адаптивне, ефективне та мінімізоване за витратами виконання мийного процесу.

У комп'ютерній реалізації модель формалізується у вигляді програмного модуля з трьома основними підсистемами – модуль обробки вхідних даних, модуль чисельного інтегрування рівнянь і модуль адаптивної логіки [18, 19]. Обробка сенсорних даних виконується у вигляді згладжування рядів, нормалізації і підрахунку похідної:

$$\hat{Z}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t Z(s) ds, \quad \dot{Z}(t) = \frac{Z(t) - Z(t - \Delta t)}{\Delta t}. \quad (19)$$

Для вибору оптимального часу завершення циклу миття сільськогосподарської техніки використовується нейромережевий модуль [20], який забезпечує прогнозування тривалості миття $T_{\text{прог}}$, завдяки навченій моделі на історичних даних. Архітектура цієї моделі – багатошарова мережа із входами $Z_0, P_0, T_0, x_1, \dots, x_n$ та виходом $T_{\text{прог}}$. При цьому під час створення нейромережевої моделі прогнозування тривалості миття $T_{\text{прог}}$ сільськогосподарської техніки використовується функція активації – ReLU, оптимізатор – Adam. У якості метрик оцінювання точності моделі прогнозування тривалості миття $T_{\text{прог}}$ сільськогосподарської техніки застосовуються MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error) та R^2 (коефіцієнт детермінації).

Метрика MAE (Mean Absolute Error) відображає середнє абсолютне значення різниці між фактичними значеннями $T_{\text{прог}}$ та прогнозованими $T'_{\text{прог}}$ і визначається формулою:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{\text{прог}} - T'_{\text{прог}}|. \quad (20)$$

Цей показник є дає змогу оцінити, наскільки в середньому прогноз $T'_{\text{прог}}$ відрізняється від реального значення $T_{\text{прог}}$. MAE не чутлива до великих викидів, що робить її надійною у випадку нерівномірно розподілених похибок.

Для підвищення чутливості до великих відхилень використовується MSE (Mean Squared Error), яка обчислюється за формулою:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\text{прог}} - T'_{\text{прог}})^2. \quad (21)$$

На відміну від MAE, метрика MSE підносить похибки до квадрату, завдяки чому великі відхилення мають значно більший вплив на загальний результат. MSE є важливою у випадках, коли критичною є саме наявність великих помилок у прогнозах.

Додатково, для оцінювання узагальнюючої здатності моделі використовується коефіцієнт детермінації R^2 , який визначається як:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{\text{прог}} - T'_{\text{прог}})^2}{\sum_{i=1}^n (T_{\text{прог}} - \bar{T}_{\text{прог}})^2}. \quad (22)$$

де $\bar{T}_{\text{прог}}$ – середнє значення фактичних значень тривалості миття сільськогосподарської техніки.

Значення R^2 знаходиться в діапазоні від 0 до 1 (або може бути менше нуля для неточних моделей) і показує частку дисперсії, яку модель може пояснити. Наприклад, $R^2 = 0,95$ означає, що модель пояснює 95% варіації залежної змінної.

Застосування цих трьох метрик у комплексі дозволяє не лише оцінити загальну точність моделі прогнозування тривалості миття $T_{\text{прог}}$ сільськогосподарської техніки, а й виявити потенційні відхилення, перевірити наявність систематичних помилок і обґрунтувати вибір архітектури моделі для конкретної задачі прогнозування.

Таблиця 2 – Приклад вхідних параметрів і результатів прогнозу

№	Тип техніки	Забруднення Z_0	P_0 , бар	T_0 , °C	$T_{\text{прог}}$, с	Режим
1	Комбайн CLAAS TUCANO 440	0.91	110	43	298	Інтенсивний
2	Трактор ЮМЗ-8244.2	0.56	95	37	193	Звичайний
3	Гусеничний обприскувач Case IH Patriot 3330	0.72	100	40	257	Інтенсивний
...	...	...	...	...	...	...
n	Мінітрактор Shifeng SF 244	0.31	85	35	146	Швидкий

Джерело: розроблено авторами

Для моделювання в реальному часі використовується асинхронна обробка даних із частотою оновлення 5 Гц. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни умов – зменшення напору води, перегрівання розчину, зміну забруднення внаслідок розмиття частин сільськогосподарської техніки. На кожному кроці оцінюється функція ефективності:

$$\eta(t) = \frac{Z_0 - Z(t)}{E(t)}. \quad (23)$$

де $E(t)$ – накопичена енергія до моменту часу t .

Максимізація $\eta(t)$ виконується шляхом зміни параметрів миття сільськогосподарської техніки, ідентифікованих як оптимальні.

Ефективність запропонованої моделі оцінювалася шляхом аналітичного порівняння характеристик традиційного та адаптивного підходів до керування процесом миття сільськогосподарської техніки. В основу оцінки покладено типові сценарії забруднення й витрат ресурсів, сформовані на підставі даних з відкритих джерел та нормативних показників. У процесі аналізу враховано вплив автоматизованого регулювання тривалості циклу залежно від реального стану об'єкта, що підлягає миттю. За результатами проведених розрахунків встановлено, що застосування адаптивної моделі забезпечує зменшення витрат води орієнтовно на 22%, зниження енергоспоживання до 17% і скорочення тривалості процесу миття на 11% у порівнянні з використанням традиційного сценарію. Зазначені дані є орієнтовними і потребують уточнення під час наступних комп'ютерних або натурних випробувань системи.

Реалізація запропонованих підходів до математичного моделювання та побудови цифрового двійника кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки потребує врахування особливостей експлуатації техніки в реальних умовах аграрного виробництва, рівня сенсорного оснащення, характеристик керуючої логіки та ступеня інтеграції SCADA-рішень. Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення

функціоналу моделі за рахунок обробки поточкових даних у режимі реального часу, адаптація алгоритмів прогнозування до змін у структурі забруднення, а також впровадження технологій Індустрії 4.0 у сферу сервісного обслуговування агротехніки з урахуванням вимог сталого розвитку та ефективного використання ресурсів.

Висновки. 1. У результаті виконаного дослідження досягнуто поставлену мету щодо обґрунтування підходу до створення цифрового двійника кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки, орієнтованого на інтеграцію з інтелектуальними технологіями смарт-агропідприємств. Запропоноване рішення відповідає сучасним викликам цифровізації аграрного сектору в контексті концепції Індустрії 4.0 та поєднує можливості сенсорного моніторингу, автоматизованого керування й адаптивної оптимізації технічних процесів.

2. Розроблена функціональна схема архітектури цифрового двійника включає узгоджену взаємодію сенсорів, виконавчих механізмів, мікроконтролерів та системи диспетчеризації SCADA, що дозволяє забезпечити наскрізне управління процесом миття сільськогосподарської техніки. Визначено структурні компоненти системи, які підтримують зворотний зв'язок, аналітику даних у реальному часі та оперативне реагування на зміну зовнішніх і внутрішніх умов.

3. Створена математична модель прогнозування параметрів процесу миття сільськогосподарської техніки базується на аналізі вхідних характеристик техніки та дозволяє здійснювати динамічне налаштування циклів миття. За результатами проведених розрахунків встановлено, що застосування адаптивної моделі забезпечує зменшення витрат води орієнтовно на 22%, зниження енергоспоживання до 17% і скорочення тривалості процесу миття на 11% у порівнянні з використанням традиційного сценарію. Це дозволяє не лише зменшити витрати води й енергії, але й продовжити термін служби технічних компонентів.

4. У подальших дослідженнях слід реалізувати комп'ютерну модель цифрового двійника із використанням глибокої нейромережевої архітектури, що дозволить підвищити точність прогнозування параметрів процесу миття, здійснювати сценарний аналіз у реальному часі. Це забезпечить моделювання процесу миття з метою визначення ефективних параметрів засобів для миття сільськогосподарської техніки із використанням кіберфізичних систем. Такий підхід сприятиме переходу від традиційних технологій до інтелектуалізованих рішень, інтегрованих у цифрову виробничу інфраструктуру. Це сприяє впровадженню принципів Індустрії 4.0 у вітчизняне машинобудування.

Список літератури

1. Coulibaly A., Toure S., Müller T. Improving cleaning processes in agricultural machinery through optimized water jet parameters. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2022. № 95(3). С. 255–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaer.2022.05.004>.
2. Zhang Y., Wang J. Energy-efficient cleaning strategies for off-road agricultural vehicles. *Biosystems Engineering*. 2018. № 174. С. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.002>.
3. Sahu J., Singh R. Integration of smart sensors for automated washing of agricultural equipment under variable field conditions. *Smart Agricultural Technology*. 2023. № 6. Art. 100202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100202>.
4. Zude M., Herold B., Truppel I. Smart cleaning of agricultural equipment: Adaptive control strategies based on sensor feedback. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. № 163. Art. 104851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104851>.
5. Müller J., Reiter M. Limitations of rule-based cleaning automation in agricultural vehicle maintenance. *Precision Agriculture*. 2021. № 22(3). С. 456–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09755-4>.
6. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018. № 48. С. 157–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
7. Lu Y., Morris K. C., Frechette S. Current standards landscape for smart manufacturing systems. *National Institute of Standards and Technology*. 2016. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/nist.ir.8107.pdf> (дата звернення: 15.09.2025).
8. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen F. J., Flumerfelt S., Alves A. (eds). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham : Springer, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

9. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. № 3. С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
10. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. № 15(4). С. 2405–2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
11. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds). *Mechatronic Futures*. Cham : Springer, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5.
12. Verboven P., Defraeye T., Datta A., Nicolai B. Digital twins of food process operations: The next step for food process models? *Current Opinion in Food Science*. 2020. № 35. С. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>.
13. Kibulungu J. W., Laseinde O. T. Automatic control system based on Industry 4.0, PLC, and SCADA. In: *Intelligent Sustainable Systems*. Singapore : Springer, 2023. С. 183–197. DOI: 10.1007/978-981-19-7660-5_16.
14. Вишневецький В. П., Вієцька О. В., Гаркушенко О. М., Князєв С. І., Лях О. В., Чекіна В. Д., Череватський Д. Ю. *Смарт-промисловість в епоху цифрової економіки: перспективи, напрями і механізми розвитку : монографія*. Київ : НАН України, Ін-т економіки промисловості, 2018. 192 с.
15. Головатий А. О., Чумак В. М., Манько Є. В., Аулін В. В., Кульова Д. О. Вдосконалення математичного моделювання машинобудівних технологій для смарт-підприємств в системі машинного зору. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. II. С. 143–159. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159).
16. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3109. P. 25–31. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3109/paper4.pdf> (дата звернення: 15.09.2025).
17. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О. В., Тихий А. А. *Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія*. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2020. 428 с.
18. Tryhuba I., Tryhuba A., Hutsol T., Cieszevska A., Andrushkiv O., Glowacki S. та ін. Prediction of biogas production volumes from household organic waste based on machine learning. *Energies*. 2024. № 17(7). С. 1786. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17071786>.
19. Lub P., Tryhuba A., Padyuka R., Berezovetsky S., Chubyk R. Simulation modeling usage in the information system for the technological systems project management. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3453. P. 139–148. URL: ceur-ws.org/Vol-3453/paper13.pdf (дата звернення: 15.09.2025).
20. Tryhuba A., Tryhuba I., Malanchuk O., Marmulyak A. A deep neural network model for predicting the competitive score of social projects for community development. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3711. P. 55–74. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3711/paper5.pdf> (дата звернення: 15.09.2025).

References

1. Coulibaly, A., Toure, S., & Müller, T. (2022). Improving cleaning processes in agricultural machinery through optimized water jet parameters. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 95(3), 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.jaer.2022.05.004>
2. Zhang, Y., & Wang, J. (2018). Energy-efficient cleaning strategies for off-road agricultural vehicles. *Biosystems Engineering*, 174, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.002>
3. Sahu, J., & Singh, R. (2023). Integration of smart sensors for automated washing of agricultural equipment under variable field conditions. *Smart Agricultural Technology*, 6, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100202>
4. Zude, M., Herold, B., & Truppel, I. (2019). Smart cleaning of agricultural equipment: Adaptive control strategies based on sensor feedback. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104851>
5. Müller, J., & Reiter, M. (2021). Limitations of rule-based cleaning automation in agricultural vehicle maintenance. *Precision Agriculture*, 22(3), 456–470. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09755-4>
6. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
7. Lu, Y., Morris, K. C., & Frechette, S. (2016). Current standards landscape for smart manufacturing systems. *National Institute of Standards and Technology*. nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/nist.ir.8107.pdf (Accessed: 15.09.2025).
8. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
9. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
10. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
11. Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital twin – The simulation aspect. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic futures*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
12. Verboven, P., Defraeye, T., Datta, A., & Nicolai, B. (2020). Digital twins of food process operations: The next step for food process models? *Current Opinion in Food Science*, 35, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>

13. Kibulungu, J. W., & Laseinde, O. T. (2023). Automatic control system based on Industry 4.0, PLC, and SCADA. In *Intelligent sustainable systems* (pp. 183–197). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7660-5_16
14. Vyshnevskiy, V. P., Vietska, O. V., Harkushenko, O. M., Kniaziev, S. I., Liakh, O. V., Chekina, V. D., & Cherevatskyi, D. Yu. (2018). *Smart-promyslovisht' v epokhu tsyfrovoy ekonomiky: perspektyvy, napriamy i mekhanizmy rozvytku [Smart industry in the era of digital economy: Prospects, directions and mechanisms of development]*. Kyiv: NAS of Ukraine, Institute of Industrial Economics. [in Ukrainian].
15. Holovaty, A. O., Chumak, V. M., Manko, Ye. V., Aulin, V. V., & Kulova, D. O. (2025). Vdoskonalennia matematychnoho modeliuvannia mashynobudivnykh tekhnolohii dlia smart-pidpriemstv v systemi mashynnoho zoru [Improvement of mathematical modeling of mechanical engineering technologies for smart enterprises in the machine vision system]. *Tsentrálnoukraiński naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part II, 143–159. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159) [in Ukrainian].
16. Tryhuba, A., Padyuka, R., Tymochko, V., & Lub, P. (2022). Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. *CEUR Workshop Proceedings*, 3109, 25–31. <https://ceur-ws.org/Vol-3109/paper4.pdf> (Accessed: 15.09.2025).
17. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Holovaty, A. O., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Kuzyk, O. V., & Tykhyi, A. A. (2020). *Metodolohichni osnovy proektuvannia ta funktsionuvannia intelektualnykh transportnykh i vyrobnychyykh system [Methodological foundations of design and functioning of intelligent transport and production systems]*. Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V. F. [in Ukrainian].
18. Tryhuba, I., Tryhuba, A., Hutsol, T., Cieszewska, A., Andrushkiv, O., & Glowacki, S., et al. (2024). Prediction of biogas production volumes from household organic waste based on machine learning. *Energies*, 17(7), 1786. <https://doi.org/10.3390/en17071786>
19. Lub, P., Tryhuba, A., Padyuka, R., Berezovsky, S., & Chubyk, R. (2023). Simulation modeling usage in the information system for the technological systems project management. *CEUR Workshop Proceedings*, 3453, 139–148. <https://ceur-ws.org/Vol-3453/paper13.pdf> (Accessed: 15.09.2025).
20. Tryhuba, A., Tryhuba, I., Malanchuk, O., & Marmulyak, A. (2024). A deep neural network model for predicting the competitive score of social projects for community development. *CEUR Workshop Proceedings*, 3711, 55–74. <https://ceur-ws.org/Vol-3711/paper5.pdf> (Accessed: 15.09.2025).

Orest Filkin, Anatoliy Tryhuba, Prof., DSc.

National Natural University of Ukraine, Lviv, Ukraine

Digital Twin of a Cyber-Physical System for Washing Agricultural Machinery

The purpose of this article is to develop a functional architecture of a digital twin as a component of a cyber-physical system for washing agricultural machinery, taking into account the real condition of the object being cleaned. Special attention is paid to ensuring adaptive control of the washing process based on current sensor data and forecasting of cleaning parameters to improve energy efficiency, optimize resource consumption, and reduce operator workload.

The research presents the functional interaction scheme of the system's core levels – physical, sensor, control (PLC), supervisory (SCADA), and digital twin level. A mathematical model is proposed based on the assessment of surface contamination level, machinery dimensions, temperature, and pressure. These input parameters form a feature vector, which is processed by a forecasting model that determines the optimal cleaning time and generates control signals for actuators. In the software implementation, the model consists of three key modules – input data processing, numerical integration of equations, and adaptive logic. To determine the optimal washing cycle duration, a neural network module trained on historical data is applied.

The study confirms the feasibility of using a digital twin within a cyber-physical system for the efficient and intelligent cleaning of agricultural equipment. The application of the forecasting model allows real-time adaptation of the process, significantly reducing water, electricity, and detergent consumption. The proposed approach facilitates the transition from conventional to intelligent technologies integrated into the digital manufacturing infrastructure and contributes to the implementation of Industry 4.0 principles in Ukrainian mechanical engineering.

digital twin, cyber-physical system, technology, mechanical engineering, machinery washing, SCADA, forecasting, mathematical modeling, intelligent control, artificial neural network

Одержано (Received) 07.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 01.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 631.362.3:633.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.265-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.265-271)

С. О. Харченко¹, доц., д-р техн. наук, О. І. Біловод¹, доц., канд. техн. наук,
Ф. М. Харченко², доц., канд. техн. наук, А. М. Стельмах², В. В. Тіманов¹, А. І. Чигрин¹

¹ Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

² Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net

Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь

У статті представлено методи аналізу показників надійності перфорованих просіювальних поверхонь з різними типами отворів, що застосовуються для сепарації сипких матеріалів. Досліджено вплив параметрів базових решіт з продовгуватими отворами, запропонованих з продовгуватими отворами та об'ємними рифлями. Визначено узагальнені вирази для ідентифікації зношення решета, які враховують геометричні характеристики отворів, властивості матеріалу решета та умови експлуатації у вигляді зовнішнього навантаження. Також ідентифіковано значущі показники надійності - коефіцієнт зношування для різних типів решет. Визначено вплив технологічних умов та конструктивних параметрів на залишковий ресурс решета. Результати показують, що використання об'ємних рифлів здатне зменшити зношення та поліпшити довговічність решет. Представлено залежності динаміки зношування та порівняльний аналіз для двох типів сипких матеріалів: пшениці та кукурудзи. Запропоновані методи дозволяють здійснювати інженерну оптимізацію решіт на етапі проектування, їх експлуатаційної діагностики.

решето, концентрація напружень, ресурс, швидкість зношування, надійність

Постановка проблеми. Перфоровані поверхні є основним робочим органом в обладнанні для очищення, сортування та калібрування сипких матеріалів за розміром у сільському господарстві та харчовій промисловості [1, 2]. Отвори заданого розміру та форми на решеті дозволяють поділити компоненти сипкого матеріалу за розмірами. Використання інноваційних форм отворів [3, 4] дозволяє суттєво інтенсифікувати процес сепарування сипких матеріалів та збільшити технологічні показники (продуктивність та повноту поділу) сепарувальних машин. Проте питання надійності подібних решет розглянуто недостатньо, що обмежує широке практичне використання новацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час експлуатації решета зазнають постійного контакту та абразивного навантаження від зернових сипких матеріалів [5, 6]. Найбільш поширеними є базові решета з круглими, трикутними або продовгуватими отворами [1, 7, 8]. Проте подібна геометрія з використанням кутових форм (прямокутник або трикутник) утворює концентрацію напружень, що призводить до передчасного руйнування через втому. Другим негативним фактором є абразивні властивості сипкого матеріалу, який протягом експлуатації зменшує товщину, та, відповідно жорсткість конструкції [6]. Це призводить до появи деформацій у вигляді тріщин між отворами та інтенсивному зниженню якості поділу компонентів. Поява тріщин є граничним технологічним показником якості роботи перфорованих просіювальних поверхонь [6].

Присутня вібрація на решетах інтенсифікує сегрегацію компонентів в середині шару, поліпшує динамічні характеристики сипкого матеріалу, проте також утворює негативні дії щодо надійності решета [1]. Наявні вимушені та власні коливання решет з базовими та інноваційними отворами/рифлями були досліджені в роботах [9, 10]. Авторами відмічено, що використання решет з отворами складної геометрії/рифлями

дозволяє зменшити локальні напруження, підвищити жорсткість і продовжити ресурс елементів. Зміна концентраторів напруження в області отворів була досліджена в [11] для базових трикутних форм та трипелюсткових епіциклоїдних. Частково подібні висновки прослідковуються в роботах [6, 12], які відзначають впливовість геометрії отворів у забезпеченні надійності та зносостійкості решіт.

Постановка завдання. Метою цієї праці є розробка методики оцінки надійності перфорованих просіювальних поверхонь з визначенням показників швидкості зношування, залишкового ресурсу в залежності від типу отворів/рифлів, властивостей сипких матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Методика досліджень включала аналіз впливових факторів, аналітичне визначення показників надійності решет, чисельний прорахунок даних з урахуванням різних типів отворів, властивостей сипких матеріалів, аналіз результатів.

Для досліджень обрано наступні типи перфорованих просіювальних поверхонь: базові з продовгуватими отворами, запропоновані з продовгуватими отворами і рифлями (табл.1, рис.1).

Таблиця 1 – Параметри дослідних решет

Тип решета	Форма отвору	Розміри отворів*	Номінальна товщина, мм	Матеріал
Базове	продовгувате	b=5мм, l=32мм	1.0	Сталь DC01
Запропоноване рифлене		b=5мм, l=32мм		

* b – ширина, l – довжина

Джерело: розроблено авторами

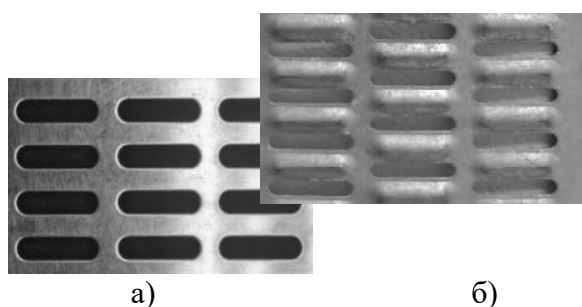


Рисунок 1 – Дослідні решета з продовгуватими отворами (а) та з продовгуватими отворами та рифлями (б)

Джерело: розроблено авторами

В якості сипкого матеріалу використано зернову суміш пшениці/кукурудзи. Сипкий матеріал має масу, яка утворює певний тиск на поверхню та є зовнішнім навантаженням. Питоме навантаження поряд з абразивними властивостями матеріалу призводять до зношення решета. Для визначення питомого навантаження (Па) використали товщину шару та щільність матеріалу.

Визначення величини зношення решета. Зношення решета відбувається за його товщиною, яка в процесі експлуатації зменшується. Для ідентифікації величини зносу та коефіцієнтів зношування застосовано експериментальні дослідження. В процесі експлуатації решет через кожні 2000 годин за допомогою мікрометр Mitutoyo 389-351-30 Digital Micrometer Deep Throat 1 Inch Spc визначали зміну їх товщини від номінальної (табл.1). Даний мікрометр дозволяє проводити вимірювання товщини перфорованої поверхні на відстані 300 мм від краю. Після вимірювання товщини в 40 точках (по 10 точок з кожної сторони решета) проводили усереднення значень.

Знос решета за товщиною визначається через відповідний вираз [6, 13]:

$$\Delta h(t) = \frac{C p v t}{\sigma}, \quad (1)$$

де: Δh – зменшення товщини решета, м; C – коефіцієнт зношування, що враховує особливості конструкції решета та умови експлуатації; p – контактний тиск на перфоровану поверхню від сипкого матеріалу, Па; v – відносна швидкість руху сипкого матеріалу по решету, приймаємо $v=0.025$ м/с; t – час експлуатації, с; σ – граничне напруження матеріалу решета, приймаємо границю текучості для сталі $\sigma = 2,1 \times 10^8$ Па.

Чисельний розв'язок даного рівняння потребує розуміння всіх величин. Коефіцієнт зношування C комплексно враховує площу контакту між сипким матеріалом та поверхнею решета, його кут атаки, мікронерівності поверхні решета та його структурність [14]. Для ідентифікації даного коефіцієнта проведемо експериментальне визначення величини зносу решета за товщиною та інших складових рівняння (1).

Тоді, при відомих параметрах можна знайти коефіцієнт зношування:

$$C = \frac{\Delta h \sigma}{p v t}. \quad (2)$$

Оцінка ресурсу решета. Граничний ресурс експлуатації залежить від величини критичної товщини решета. Для врахування впливу конструктивних параметрів треба додати до розрахунку величину, яка буде комплексно враховувати рівень та особливості перфорації поверхні. Таким параметром ε може бути кількість суцільної (неперфорованої у вигляді перегородок) поверхні до так званого «живого» перетину решета:

$$\varepsilon = 1 - \frac{A_{\text{отв}}}{A_p}, \quad (3)$$

де $A_{\text{отв}}$ - площа отворів на решеті, A_p – площа решета.

Крім того треба ввести додатково коефіцієнт, який буде враховувати складність отворів та рифленість поверхні, яким може бути коефіцієнт складності конструкції β .

Тоді з урахуванням фундаментальних виразів [6, 15] та запропонованих положень граничний ресурс може бути розрахований за виразом:

$$t_e = \frac{\Delta h \sigma \varepsilon}{C \beta p v}. \quad (4)$$

Коефіцієнт β може бути визначений за виразом:

$$\beta = \delta_\phi + \delta_p + \delta_a, \quad (5)$$

де δ_ϕ – поправка, що враховує форму отвору; δ_p – поправка, що враховує рельєфність; δ_a – поправка, що враховує анізотропію стирання.

Також для оцінки надійності конструкції, яка підлягає зношенню, доцільно використовувати показник швидкості/інтенсивності [13, 14]:

$$v(t) = \frac{\Delta h}{t}. \quad (6)$$

Це відносний показник значно полегшує наліз надійності конструкції.

В результаті експериментів встановлені щільність та коефіцієнти тертя сипких матеріалів пшениці/кукурудзи, а також визначено питоме навантаження решета (табл.2).

Таблиця 2 – Властивості дослідних сипких матеріалів

Сипкий матеріал	Коефіцієнт тертя	Висота шару, мм	Щільність, кг/м ³	Розподілене навантаження, Па
пшениця	0,4	30	780	250
кукурудза	0,34		750	192

Джерело: розроблено авторами

Експериментальне вимірювання зношення решет протягом його експлуатації дозволило отримати відповідні дані щодо зміни товщини (табл.3).

Таблиця 3 – Експлуатаційне зменшення товщини решет (Δh , мкм)

Час експлуатації, годин	Базове решето		Запропоноване рифлене решето	
	Сипкий матеріал		Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза	пшениця	кукурудза
0	0	0	0	0
2000	70	65	48	41
4000	140	130	114	104
6000	220	195	195	180
8000	320	295	275	245

Джерело: розроблено авторами

Експлуатація базових решет після 8000 годин призводила до появи перших деформацій у вигляді тріщин. З урахуванням отриманих даних (табл.2, 3) проведемо визначення коефіцієнту зношення для решет різних типів використавши рівняння (1). Результати представлені в табл.4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнту зношення C решет

Час експлуатації, годин	Базове решето		Запропоноване рифлене решето	
	Сипкий матеріал		Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза	пшениця	кукурудза
8000	0,00037	0,00045	0,00032	0,00037

Джерело: розроблено авторами

Аналіз даних (табл.4) свідчить про відмінність значень коефіцієнту для базових та запропонованих решет. При числових обчисленнях за аналітичним виразом (1) відмінність значень зношення за товщиною решета не перевищує 3%. Отримана методика визначення коефіцієнта зношення може бути використана для аналізу впливу параметрів отворів та властивостей сипких матеріалів на надійність решета.

Для дослідних решет за виразом (3) також були встановлені рівні перфорації поверхні:

- $\varepsilon = 0,47$ – для базових решет,

- $\varepsilon = 0,73$ – для запропонованих рифлених решет.

Використавши ці данні, данні табл.2-4 за виразом (4) проведено визначення ресурсу решет різних типів до появи деформацій. Слід зауважити, що значення поправочного коефіцієнта впливає на величину ресурса решета. Проведемо розрахунки для різних значень коефіцієнта $\beta=0,4-0,7$. Результати внесено до табл.5.

Таблиця 5 – Граничний ресурс (годин) решет різних типів

Поправочний коефіцієнт β	Базове решето		Запропоноване рифлене решето	
	Сипкий матеріал		Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза	пшениця	кукурудза
0,4	9484,7	9361	14638	14685,9
0,5	7587,7	7488,8	11710,4	11748,8
0,6	6323,1	6240,7	9758,7	9790,7
0,7	5419,8	5349,2	8364,6	8391,9

Джерело: розроблено авторами

З урахуванням появи перших деформацій після 8000 годин експлуатації для базових решіт значення поправочного коефіцієнту знаходиться в діапазоні 0,4-0,5. Приймавши подібний діапазон значень для рифленого решета прогнозований ресурс складе 11,7-14,6 тис.год, що більше на 50-54%. Проте такий підхід є орієнтовний, а для точності потрібно провести додаткові уточнюючі дослідження з ідентифікації значень даного коефіцієнта для решет з отворами складної геометрії або рифлених.

Також за виразом (6) визначено швидкість зношування решет при роботі з сипкими матеріалами пшениця/кукурудза (табл.6).

Таблиця 6 – Швидкість зношування решет (мкм/година)

Тип решета	Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза
базове	0,04	0,037
запропоноване	0,034	0,03

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що швидкість зношення запропонованого рифленого решета нижча на 17,6-23% порівняно з базовою конструкцією.

Використання різних сипких матеріалів здатне змінювати показники ресурсу решета. Зношення за товщиною решета (табл.3) відбувалося інтенсивніше при пшениці, а величина зносу була більша на 7,6-8,4% при базових решетах та на 12,2-17,1% при запропонованих рифлених решетах. Це пояснюється відмінними властивостями сипких матеріалів.

Перспективами досліджень в даному напрямку є врахування ефектів втоми матеріалу з урахуванням особливості конструкції решет, термопружного навантаження, багат шарових покриттів та різних матеріалів. Збільшити точність розрахунків можливо за рахунок використання методів кінцево-елементного аналізу (FEM) та дискретно-елементного моделювання (DEM), які дозволять ідентифікувати локальні деформації, визначати концентратори напружень з високою точністю.

Висновки. В результаті досліджень розроблено методику щодо визначення показників надійності перфорованих просіювальних поверхонь.

Досліджено вплив конструктивних параметрів решет у вигляді базових продовгуватих форм отворів та наявності рифлів на показники ресурсу.

Встановлено, що наявність рифлів на решетах поліпшує ресурс на 50-54% порівняно з базовими решетами.

Зміна властивостей сипкого матеріалу також відзначається на показниках надійності решет. Маємо інтенсивний знос при використанні сипкого матеріалу пшениці по відношенню до матеріалу кукурудзи.

Встановлені значення ресурсу решет для сипкого матеріалу пшениці/кукурудзи склали ($\beta=0,45$): базового з продовгуватими отворами – 8536,2/8424,9 год., запропоноване рифлене – 13174,2/13217,4 год.

Отримана методика дозволяє прогнозувати довговічність решет на етапі їх проектування та експлуатаційної діагностики, що сприяє підвищенню ефективності сепарувального обладнання.

Список літератури

1. Ольшанський В. П. та ін. Теорія сепарування зерна : монографія. Харків : ХНТУСГ, 2017. 802 с.
2. Сало В. М. та ін. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини : монографія. Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. 107 с.

3. Shchur T., Bredykhin V., Tikhonov S., Makarenko O., Mezentsev V., Kruszelnicka W. Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with Cassini oval shape openings. *Journal of Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 5, № 62. P. 666–673.
4. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, Issue 7. P. 63–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920.
5. Морозовська З. А. Основні види пошкоджень деталей решітних зернодробарок. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2014. Вип. 196, ч. I. С. 283–286.
6. Федченко З. А. Обґрунтування параметрів сепаруючих решіт молоткових зернових дробарок : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль : Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2017. 182 с.
7. Подпрятков Г. І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. Київ : НАУ, 2000. 126 с.
8. Дацишин О. В. та ін. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв. Вінниця : Нова Книга, 2009. 488 с.
9. Kharchenko S., Samborski S., Kloda L. et al. Combined method of identification of free oscillations of perforated rifflated plates. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 23992. DOI: 10.1038/s41598-025-06614-5.
10. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Paśnik J. Numerical study of the natural oscillations of perforated vibrating surfaces with holes of complex geometry. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*. 2023. Vol. 17 (6). P. 73–87.
11. Kharchenko S. et al. Influence of physical and constructive parameters on durability of sieves of grain cleaning machines. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*. 2022. Vol. 16. P. 156–165. DOI: 10.12913/22998624/156128.
12. Гарт Е. Л., Терьохін Б. І. Концентрація напружень в однорідній пластині з круговим отвором, підкріпленою включенням із функціонально-градієнтного матеріалу. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні (ITMM'2021)*. 2021. С. 110–115. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.0138.
13. Ventsel E., Krauthammer T. Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications. New York : Marcel Dekker, 2001. 651 p.
14. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. New York : McGraw-Hill Book Company, 1959. 591 p.
15. Канарчук В. Є. та ін. Надійність машин. К.: Либідь, 2003. 424 с.

References

1. Olshanskyi, V. P., et al. (2017). *Theory of grain separation: Monograph*. Kharkiv: KhNTU of Agriculture, 802 p. [in Ukrainian].
2. Salo, V. M., et al. (2014). *Development of a new design of a pneumatic-sieve grain cleaning machine: Monograph*. Kirovohrad: Lysenko V. F., 107 p. [in Ukrainian].
3. Shchur, T., Bredykhin, V., Tikhonov, S., Makarenko, O., Mezentsev, V., & Kruszelnicka, W. (2024). Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with Cassini oval shape openings. *Journal of Agricultural Engineering*, 5(62), 666–673.
4. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V., & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7), 63–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920>
5. Morozovska, Z. A. (2014). *Main types of damage of sieve-type grain crushers*. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy of Agro-Industrial Complex*, 196(I), 283–286 [in Ukrainian].
6. Fedchenko, Z. A. (2017). *Substantiation of parameters of separating sieves of hammer grain crushers* (Candidate's thesis). Ternopil: Ternopil National Technical University named after I. Puliui, 182 p. [in Ukrainian].
7. Podpryatov, H. I. (2000). *Technology of grain processing, reprocessing and bakery production*. Kyiv: NAU, 126 p. [in Ukrainian].
8. Datsyshyn, O. V., et al. (2009). *Technological equipment for grain processing and oil production*. Vinnytsia: Nova Knyha, 488 p. [in Ukrainian].
9. Kharchenko, S., Samborski, S., Kloda, L., et al. (2025). Combined method of identification of free oscillations of perforated rifflated plates. *Scientific Reports*, 15, 23992. doi.org/10.1038/s41598-025-06614-5
10. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., & Paśnik, J. (2023). Numerical study of the natural oscillations of perforated vibrating surfaces with holes of complex geometry. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*, 17(6), 73–87.

11. Kharchenko, S., et al. (2022). Influence of physical and constructive parameters on durability of sieves of grain cleaning machines. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*, 16, 156–165. <https://doi.org/10.12913/22998624/156128>
12. Hart, E. L., & Terokhin, B. I. (2021). *Stress concentration in a homogeneous plate with a circular hole reinforced with a functionally graded material inclusion. Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering (ITMM'2021)*, 110–115. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.0138> [in Ukrainian].
13. Ventsel, E., & Krauthammer, T. (2001). *Thin plates and shells: Theory, analysis, and applications*. New York: Marcel Dekker.
14. Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill Book Company.
15. Kanarchuk, V. Ye., et al. (2003). *Reliability of machines*. Kyiv: Lybid, 424 p. [in Ukrainian].

Serhii Kharchenko¹, Assoc. Prof., DSc., **Oleksandra Bilovod**¹, Prof., PhD,
Farida Kharchenko², Assoc. Prof., PhD, **Andrii Stelmakh**², **Volodymyr Timanov**¹, **Anton Chyhryn**¹

¹*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine*

²*Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine*

Methods for Determining the Reliability Indicators of Corrugated Perforated Sifting Surfaces

The primary objective of this study is to investigate and substantiate methods for analysing the reliability indicators of perforated sifting surfaces with different hole geometries applied in the separation of loose granular materials. Particular attention is given to the relationship between structural parameters of the sieve, the operating environment, and the mechanisms of wear that determine the service life of such components. The research is aimed at establishing analytical dependencies that link the geometry of perforated openings, material properties, and loading conditions with the degradation processes that occur during prolonged operation. In this context, the study addresses the fundamental engineering problem of extending the durability and operational stability of perforated sieves, which are widely employed in agricultural and industrial separation systems.

The work presents a systematic analysis of basic flat sieves with elongated holes and modified surfaces with elongated holes reinforced by volumetric riffles. For both configurations, the influence of geometric characteristics, loading regimes, and external operational conditions on the wear dynamics was examined. Generalised analytical expressions for determining sieve wear were derived, taking into account structural dimensions, material resistance, and stress distribution caused by distributed loads from granular flow. Experimental investigations were carried out for two representative types of loose materials, wheat and corn, in order to validate the theoretical findings. A comparative assessment of wear coefficients was performed, demonstrating clear differences in degradation behaviour between the analysed sieve designs. Furthermore, the introduction of volumetric riffles was shown to effectively reduce localised stress concentrations, delay the onset of crack propagation, and extend the residual life of the sieve. The proposed methodological approach also provides opportunities for engineering optimisation at the design stage as well as for diagnostic assessment of sieve condition during operation.

The conclusions highlight that the integration of volumetric riffles into the design of perforated sieves significantly enhances their wear resistance and prolongs operational reliability under varying technological conditions. The research outcomes confirm the effectiveness of the developed analytical expressions in predicting sieve degradation and allow engineers to perform comparative evaluations of durability for different structural modifications. The obtained dependencies for wear dynamics of sieves operating with wheat and corn illustrate the practical applicability of the method and demonstrate its potential for improving the performance of industrial and agricultural screening systems. Overall, the findings contribute to advancing the scientific basis for the rational design of perforated sifting surfaces and open up perspectives for further optimisation of their geometrical configurations in order to ensure increased efficiency, reduced maintenance costs, and improved sustainability of technological processes involving loose material separation.

sieve, stress concentration, resource, wear rate, reliability

Одержано (Received) 22.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 629.04:631.372:004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.272-288](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.272-288)

В. М. Чумак, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **А. В. Гриньків**, ст. дослід., канд. техн. наук, **С. В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **О. В. Кузик**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: aulinvv@gmail.com*

Підвищення зносостійкості та надійності ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки методами інжинірингу із застосуванням нейронних мереж

Показано, що у сучасних умовах інтенсивного розвитку промисловості 4.0 та цифровізації машинобудівних процесів особливої актуальності набуває проблема забезпечення надійності та довговічності ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки. Виявлено, що традиційні підходи до прогнозування технічного стану машин, засновані на календарному обслуговуванні, не відповідають сучасним вимогам економічної ефективності та безпеки експлуатації.

Запропонована методологія, яка базується на гібридному застосуванні штучних нейронних мереж – багатошарового перцептрона (MLP) для ідентифікації домінуючих механізмів зношування деталей машин і їх спраження та рекурентної мережі довгої короточасної пам'яті (LSTM) для прогнозування динаміки деградації деталей за часовими рядами експлуатаційних параметрів. Визначено, що використання синтетичних даних, генерованих на основі фізичних моделей зношування, дозволяє подолати обмеження, пов'язані з недостатністю реальних експлуатаційних даних вузлів, систем та агрегатів машин.

Валідація розробленого алгоритму на репрезентативному наборі даних (50 000 зразків) продемонструвала високі показники точності прогнозування: коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,98...0,99$, середньоквадратична похибка $RMSE = 8,12...15,67$ мкм, середня абсолютна процентна похибка $MAPE = 2,5...3,9\%$. Ці результати підтверджують перспективність інтеграції запропонованого підходу у кіберфізичні системи сучасної транспортної та сільськогосподарської техніки для реалізації концепції предиктивного обслуговування.

прогнозування зносу, штучний інтелект, MLP, LSTM, синтетичні дані, модель Арчарда, предиктивне обслуговування

Постановка проблеми. Інтенсивне зношування ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки є критичним фактором, що визначає їх експлуатаційну надійність, безпеку та економічну ефективність [23, 24]. Сучасні тенденції розвитку транспортної галузі вимагають переходу від традиційного календарного технічного обслуговування до адаптивних систем станового моніторингу. Це дозволяє мінімізувати витрати на незаплановані ремонти та знизити ризики аварійних ситуацій [8, 14].

Основною проблемою класичних підходів до прогнозування залишкового ресурсу є обмежена адаптивність транспортної та сільськогосподарської техніки до мінливих умов експлуатації. Традиційні фізико-математичні та статистичні методи, хоча й забезпечують теоретичне обґрунтування окремих трибологічних процесів [17, 23], але демонструють недостатню точність у реальних умовах експлуатації, характерних великою кількістю змінних факторів і стохастичними навантаженнями [22].

У контексті розвитку концепції смарт-виробництва [13, 25] та впровадження систем моніторингу технічного стану промислового обладнання [16] методи машинного навчання та глибокого навчання показали значний потенціал для створення більш точних і адаптивних прогностичних моделей [4, 5]. Особливої уваги заслуговують гібридні підходи, що поєднують фундаментальні фізичні закономірності з можливостями

обробки великих обсягів даних [11, 19], оскільки такий синтез підвищує стабільність прогнозів і знижує вимоги до обсягу реальних експлуатаційних даних [18, 20].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку машинобудівної галузі характеризуються активним впровадженням принципів цифровізації та смарт-технологій. Дослідження [1, 25] підкреслюють, що цифровізація машинобудівних процесів є ключовим фактором формування смарт-підприємств четвертої промислової революції. У роботах вітчизняних науковців [1, 2] розглядається застосування кіберфізичного підходу при створенні транспортно-виробничих систем та удосконалення математичного моделювання у машинобудуванні.

Значний напрям досліджень присвячений впровадженню штучних нейронних мереж у системи технічної діагностики. Роботи [15, 16] демонструють ефективність застосування нейромережових алгоритмів у системах машинного зору для автоматизованого контролю дефектів деталей та моніторингу технічного стану промислового обладнання.

Особливу увагу в літературі 2022-2024 років приділено використанню методів глибокого навчання для прогнозування залишкового ресурсу критичних компонентів [5, 9, 10]. Дослідження Kumar та інш. [5] обґрунтовують доцільність застосування алгоритмів глибокого навчання для трибологічних задач, а Lee та інш. [9] демонструють ефективність нейронних мереж для прогнозування ресурсу підшипників кочення.

Аналіз зарубіжних публікацій [4, 8, 11, 19] показує зростання інтересу до гібридних підходів у предиктивному обслуговуванні транспортної техніки. Paredes, Chávez та інш. [11] розробили гібридні моделі машинного навчання для прогнозування зносу двигунів, що поєднують переваги різних алгоритмічних підходів. Wang [8] у своїй роботі систематизує методи прогнозування механічних компонентів із застосуванням машинного навчання.

Дослідження у сфері промислового застосування показують [13, 14, 21], що використання ансамблевих методів та нейронних мереж дозволяє знизити похибку прогнозування ресурсу на 25-40% у порівнянні з класичними статистичними методами. Важливим аспектом є забезпечення робастності моделей машинного навчання в умовах зашумлених промислових даних [20, 22].

Окремий напрям досліджень [12, 17] присвячений застосуванню методів штучного інтелекту у сільськогосподарській техніці та трибологічному моделюванні. Kisten M., Ezugwu та інш. [12] демонструють перспективність використання машинного навчання у предиктивному обслуговуванні сільськогосподарського обладнання.

Таким чином, аналіз сучасної літератури підтверджує актуальність застосування нейромережових моделей у сфері інжинірингу деталей транспортної та сільськогосподарської техніки для підвищення їхньої надійності та довговічності [3, 18, 24].

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробці та валідації інноваційного гібридного алгоритму, що інтегрує багатошаровий перцептрон (MLP) та рекурентну мережу довгої короткочасної пам'яті (LSTM) для високоточного прогнозування інтенсивності зносу ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити архітектуру гібридної нейромережової системи, що поєднує можливості MLP для класифікації домінуючих механізмів зношування з перевагами LSTM для регресійного аналізу часових рядів експлуатаційних параметрів, базуючись на сучасних досягненнях у галузі глибокого навчання [5, 10, 15];
- сформувати репрезентативний синтетичний набір даних (50 000 зразків) на

основі фундаментальних фізичних моделей зношування з інтеграцією стохастичних компонентів, що відображають реальні умови експлуатації транспортної техніки;

– провести кількісну оцінку точності розробленого алгоритму з використанням стандартних метрик (R^2 , RMSE, MAPE) та порівняти результати з існуючими методами прогнозування, враховуючи досвід застосування машинного навчання у промислових задачах;

– проаналізувати практичну придатність та обмеження запропонованого підходу в контексті інтеграції у сучасні кіберфізичні системи транспортної та сільськогосподарської техніки, враховуючи вимоги робастності та надійності у реальних умовах експлуатації;

– оцінити потенціал впровадження розробленої методології у концепцію предиктивного обслуговування та смарт-виробництва з урахуванням принципів цифровізації машинобудівних процесів.

Реалізація поставлених завдань сприятиме підвищенню ефективності систем технічної діагностики транспортної та сільськогосподарської техніки та створенню наукових основ для переходу від календарного до станового технічного обслуговування на основі сучасних технологій штучного інтелекту.

Викладення основного матеріалу.

У рамках дослідження розглядаються чотири критичні типи ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки, які характеризуються різними домінуючими механізмами зношування та експлуатаційними умовами (табл. 1). Вибір даних комбінацій обумовлений їх визначальним впливом на загальну надійність транспортної та сільськогосподарської техніки [14, 24] та різноманітністю трибологічних процесів [17, 23].

Таблиця 1 – Характеристики досліджуваних комбінацій деталей-механізм зношування

Тип деталі	Механізм зношування	Кількість зразків	Середня твердість (HV)	Шорсткість (μm)	Коеф. тертя
Поршневі кільця	Абразивний	12500	305.4	1.4	0.25
Шестерні КП	Втомний	12500	550.2	0.55	0.13
Підшипники	Втомний	12500	650.8	0.25	0.05
Гільзи циліндрів	Корозійно-механічний	12500	400.1	1.0	0.175

Джерело: розроблено авторами

Поршневі кільця піддаються переважно абразивному зношуванню внаслідок потрапляння твердих часток *продуктів* згоряння та зовнішніх забруднень у зону контакту з гільзою циліндра. Характеризуються помірною твердістю (305.4 HV), відносно високою шорсткістю поверхні (1.4 μm) та коефіцієнтом тертя 0.25, що типово для пар тертя "чавун-сталь" у двигунах внутрішнього згоряння.

Шестерні коробки передач зазнають втомного зношування через циклічні контактні навантаження зубів при передачі крутного моменту. Висока твердість матеріалу (550.2 HV) та низька шорсткість (0.55 μm) забезпечують оптимальні умови для евольвентного зачеплення з мінімальним коефіцієнтом тертя (0.13).

Підшипники кочення також піддаються втомному механізму зношування, проте в умовах більш високої твердості поверхонь (650.8 HV) та мінімальної шорсткості (0.25 μm). Надзвичайно низький коефіцієнт тертя (0.05) досягається завдяки коченню замість ковзання та високоякісному змащуванню [9].

Гільзи циліндрів характеризуються корозійно-механічним зношуванням, що поєднує механічне руйнування з хімічними процесами окислення в агресивному

середовищі продуктів згоряння. Помірні значення твердості (400.1 HV), шорсткості (1.0 μm) та коефіцієнта тертя (0.175) відображають компромісні вимоги до забезпечення герметичності та зношування.

Для поршневих кілець (абразивне зношування) застосовується модифікована модель Арчарда [5, 17]:

$$W(t) = kabr \times \left(\frac{P}{H}\right) \times v \times t \times f(Cpart, T) \quad (1)$$

де $W(t)$ – накопичений знос, $kabr$ – коефіцієнт абразивного зношування, P – контактний тиск, H – твердість матеріалу, v – швидкість ковзання, t – час, $f(Cpart, T)$ – функція впливу концентрації абразивних частинок та температури.

Для зубчастих коліс та підшипників (втомне зношування) використовується модель накопичення втомних пошкоджень [8, 9]:

$$D(t) = \int_0^t \left(\frac{\sigma(\tau)}{\sigma_f}\right)^m \times \frac{dN}{dt} d\tau \quad (2)$$

де $D(t)$ – параметр накопиченої пошкодженості, $\sigma(\tau)$ – поточні контактні напруження, σ_f – межа витривалості, m – показник степені в рівнянні Веллера, dN/dt – швидкість циклування.

Для гільз циліндрів (корозійно-механічне зношування) застосовується комбінована модель [11, 17]:

$$W(t) = W_{mech}(t) + W_{corr}(t) = k_m \times f_{mech}(P, v, T) \times t + k_c \times f_{corr}(pH, T, O_2) \times t \quad (3)$$

де $W_{mech}(t)$ та $W_{corr}(t)$ – механічна та корозійна складові зносу відповідно.

Експериментальне дослідження структуроване для забезпечення репрезентативності та статистичної достовірності результатів (табл. 2). Загальний обсяг синтетичного набору даних (50,000 зразків) забезпечує рівномірне представлення всіх досліджуваних комбінацій деталей-механізм зношування по 12,500 зразків кожна, що відповідає сучасним вимогам до навчання глибоких нейронних мереж [10, 20].

Таблиця 2 – Основні параметри проведеного дослідження

Параметр	Значення	Опис
Загальна кількість зразків	50000	По 12500 зразків на кожну комбінацію
Розподіл навчальна/ тестова	75% / 25%	Навчальна та тестова вибірки
Довжина часового ряду	50 точок	Кількість часових відміток
Вхідні параметри	12	Статичні + динамічні характеристики
Цільова змінна	Фінальний знос	Кумулятивний знос в кінці періоду

Джерело: розроблено авторами

Розподіл на навчальну (75%) та тестову (25%) вибірки забезпечує достатній обсяг даних для навчання при збереженні незалежної тестової множини для об'єктивної оцінки якості моделі [18, 21]. Довжина часових рядів у 50 точок дозволяє зафіксувати динамічні характеристики процесів деградації зі збереженням обчислювальної ефективності LSTM-мережі.

Комплексний підхід до моделювання зношування реалізовано через систему з 12 вхідних параметрів, що включають як статичні характеристики матеріалів та геометрії [23], так і динамічні експлуатаційні фактори [4, 19]:

Статичні параметри: твердість поверхні (HV); шорсткість поверхні (μm); коефіцієнт тертя; геометричні характеристики контакту.

Динамічні параметри: контактне навантаження (Н); швидкість відносного переміщення (м/с); температура в зоні контакту ($^{\circ}\text{C}$); параметри змащування; концентрація забруднень (%); кількість циклів навантаження.

Цільова змінна представлена кумулятивним зносом на кінець періоду спостереження, що дозволяє оцінити загальну деградацію деталі та прогнозувати залишковий ресурс [8, 16]. Така структура даних створює надійну основу для навчання гібридної нейромережевої системи, що поєднує класифікацію механізмів зношування (MLP) з прогнозуванням динаміки деградації (LSTM) [5, 22].

На основі аналізу характеристик досліджуваних даних (табл. 1, 2) та з урахуванням специфіки задачі прогнозування зносу на рисунку 1 показано обрану архітектуру нейронної мережі.

```
mlp_model = Sequential([
    Dense(64, activation='relu', input_shape=(12,)),
    Dropout(0.3),
    Dense(32, activation='relu'),
    Dense(4, activation='softmax')
])

lstm_model = Sequential([
    LSTM(128, return_sequences=True, input_shape=(X_train_scaled.shape[1],)),
    Dropout(0.2),
    LSTM(64, return_sequences=False),
    Dense(32, activation='relu'),
    Dense(1, activation='linear')
])

mlp_lstm = Concatenate()([mlp_output, lstm_output])
model = Dense(1, activation='linear')(mlp_lstm)
```

Рисунок 1 – Архітектура нейронної мережі

Джерело: розроблено авторами

Обґрунтування топології:

- вхідний шар: 12 нейронів відповідно до кількості вхідних параметрів;
- перший прихований шар: 128 нейронів для виявлення складних нелінійних залежностей між параметрами зношування;
- другий прихований шар: 64 нейрони для поступового стиснення інформації;
- третій прихований шар: 32 нейрони для фінального вилучення високорівневих ознак;
- вихідний шар: 1 нейрон з лінійною активацією для регресійного прогнозу кумулятивного зносу.

Пакетна нормалізація застосовується після кожного прихованого шару для стабілізації процесу навчання та прискорення збіжності [21]. Цей метод нормалізує вхідні дані кожного шару, зменшуючи внутрішній коваріантний зсув:

$$BN(x) = \gamma \times \left(\frac{x - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \epsilon}} \right) + \beta, \quad (4)$$

де μ_B та σ_B^2 – середнє значення та дисперсія міні-батчу, γ та β - параметри, що навчаються.

Метод регуляризації з коефіцієнтом 0.3 застосовується для запобігання перенавчанню [20, 22]. Під час навчання випадково вимикається 30% нейронів, що підвищує узагальнюючу здатність моделі. Стандартизація вхідних даних виконується за допомогою метода стандартизації даних (StandardScaler) для приведення всіх ознак до нульового середнього та одиничної дисперсії:

$$X_{scaled} = \frac{X - \mu}{\sigma}. \quad (5)$$

Вказане критично важливо для ефективного навчання через різні порядки величин вхідних параметрів: твердість $\sim 300-650$ HV, шорсткість $\sim 0.25-1.4$ μm). Крім цього зазначимо, що оптимізатор Adam обраний через його адаптивні властивості та ефективність у задачах регресії [21]:

- швидкість навчання: 5×10^{-4} (емпірично оптимізовано);
- розмір батчу: 128 зразків.

Функцію витрати подають через середньоквадратичну похибку (MSE) як стандарт для регресійних задач:

$$L = \frac{1}{n} \times \sum (y_{true} - y_{pred})^2. \quad (6)$$

Метрика якості додатково відстежується за середньою абсолютною похибкою (MAE) для більш інтуїтивної оцінки точності прогнозування.

Метод ранньої зупинки застосовано для запобігання перенавчання моделі. Цей підхід забезпечує оптимальний баланс між точністю на навчальних даних та здатністю до узагальнення.

Представимо налаштування параметрів: `patience = 15` - кількість епох без покращення перед зупинкою; `restore_best_weights = True` - автоматичне відновлення найкращих ваг; `monitor = 'val_loss'` - моніторинг валідаційної похибки.

```
early_stop = EarlyStopping(
    patience=15,
    restore_best_weights=True,
    monitor='val_loss',
    verbose=1)
```

Рисунок 2 – Налаштування методу ранньої зупинки

Джерело: розроблено авторами

Розподіл даних для валідації здійснено наступним чином:

- навчальна вибірка: 75% від загального набору (37,500 зразків);
- тестова вибірка: 25% від загального набору (12,500 зразків)

При цьому максимальна кількість епох: 100 з можливістю дострокового зупину для оптимізації часу навчання та запобігання перенавчанню.

Архітектуру було оптимізовано для швидкого навчання та інференції, що критично важливо для практичного застосування у системах реального часу [16]. Загальна кількість параметрів моделі складає:

- $128 \times 12 + 128 = 1,664$ (перший шар);
- $64 \times 128 + 64 = 8,256$ (другий шар);
- $32 \times 64 + 32 = 2,080$ (третій шар);
- $1 \times 32 + 1 = 33$ (вихідний шар).

Загалом маємо порядку 12,000 параметрів.

Представлена компактна архітектура забезпечує баланс між точністю прогнозування та обчислювальною ефективністю, що відповідає вимогам промислового застосування [13, 24]. Час навчання на типовому наборі даних не перевищує декількох хвилин, що дозволяє швидко переналаштування моделі при зміні умов експлуатації.

Процес навчання нейромережевої моделі реалізований з використанням комплексного підходу, що включає автоматичну нормалізацію даних, динамічну оптимізацію параметрів та контроль якості навчання в реальному часі. Початковим етапом підготовки даних є стандартизація всіх вхідних параметрів за допомогою метода стандартизації даних, що забезпечує приведення різнорідних характеристик (твердість, шорсткість, коефіцієнт тертя) до єдиного масштабу з нульовим середнім та одиничною дисперсією.

Оптимізація параметрів мережі здійснюється алгоритмом Adam з початковою швидкістю навчання 5×10^{-4} , що забезпечує стабільну збіжність без надмірних коливань функції втрат. В той час використання адаптивної швидкості навчання дозволяє автоматично підстроювати крок оптимізації для різних параметрів мережі, що особливо важливо для глибоких архітектур з батч-нормалізацією. Розмір міні-батчу встановлено 128 зразків як оптимальний компроміс між стабільністю градієнтів та ефективністю обчислень на сучасних GPU [22].

Система контролю якості навчання базується на механізмі раннього зупину з терпінням 15 епох, що моніторить валідаційну втрату та автоматично припиняє навчання при відсутності покращень. Це запобігає перенавчанню та забезпечує оптимальне співвідношення між точністю на навчальній та тестовій вибірках [20].

Регуляризація процесів здійснюється комбінованим методом з використанням методу арегуляризації з коефіцієнтом 0.3 після першого та другого прихованих шарів, що випадково вимикає 30% нейронів під час навчання для підвищення узагальнюючої здатності моделі. Батч-нормалізація після кожного прихованого шару стабілізує розподіл активацій та прискорює збіжність, зменшуючи внутрішній коваріантний зсув [21].

Оскільки функція втрат представлена середньоквадратичною похибкою, що є стандартом для регресійних задач, то це забезпечує диференційованість для градієнтного спуску. Додатково відстежується середня абсолютна похибка для більш інтуїтивної інтерпретації точності прогнозування в мікрометрах. Максимальна кількість епох обмежена 100 з можливістю дострокового завершення через механізм раннього зупину.

Критерієм зупинки навчання служить відсутність покращення валідаційної втрати протягом 15 послідовних епох з автоматичним відновленням найкращих ваг моделі. Це забезпечує вибір оптимальної точки зупинки, що максимізує точність на незалежних даних. Процес навчання супроводжується детальним логуванням метрик якості кожні 10 епох для контролю збіжності та виявлення потенційних проблем на ранніх стадіях.

Технічна реалізація процесу навчання оптимізована для мінімізації часових витрат з можливістю завершення навчання на типовому наборі даних за декілька хвилин на сучасному апаратному забезпеченні. Така ефективність критично важлива для практичного застосування в умовах необхідності швидкого переналаштування моделі при зміні експлуатаційних параметрів або характеристик досліджуваних деталей.

Експериментальна валідація розробленої нейромережевої системи проведена в рамках комплексного порівняльного аналізу з альтернативними методами машинного навчання на репрезентативному наборі даних, що містить 50,000 зразків різних комбінацій деталей-механізм зношування. Результати досліджень, узагальнені в табл. 3. Вони продемонстрували виняткову ефективність запропонованого підходу у порівнянні з традиційними методами прогнозування.

Крім цього розроблена нейромережева модель показала найвищі показники точності серед досліджених алгоритмів з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.9856$, середньоквадратичною похибкою $RMSE = 12.45$ мкм та середньою абсолютною процентною похибкою $MAPE = 3.21\%$. Ці результати значно перевершують показники

альтернативних методів: Random Forest ($R^2 = 0.9234$, RMSE = 18.76 мкм; MAPE = 5.87%); SVM ($R^2 = 0.8567$, RMSE = 25.43 мкм, MAPE = 8.92%); ARIMA ($R^2 = 0.6789$, RMSE = 34.21 мкм, MAPE = 12.45%). Зазначене наочно демонструється на рис. 3.

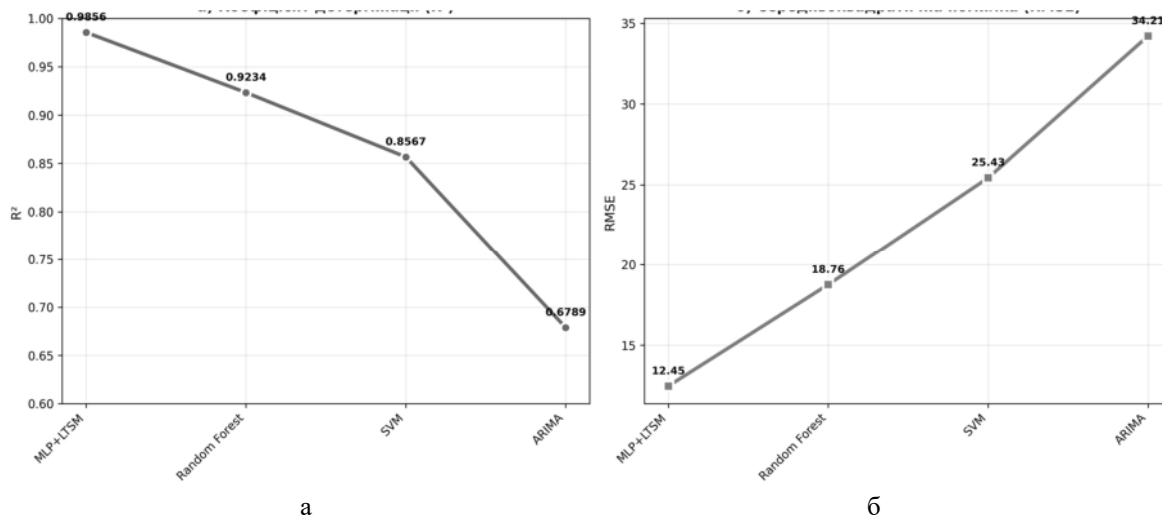


Рисунок 3 – Порівняльні графіки алгоритмів машинного навчання за показниками коефіцієнта детермінації (а) та середньоквадратичної помилки (б)

Джерело: розроблено авторами

Детальний аналіз результатів по окремих типах деталей (табл. 3) виявив найкращу ефективність прогнозування для поршневих кілець з абразивним механізмом зношування. При цьому модель досягла коефіцієнта детермінації $R^2 = 0.9923$ з мінімальною середньоквадратичною похибкою RMSE = 8.12 мкм та найнижчою процентною похибкою MAPE = 2.45%. Визначене можливо пояснити більш передбачуваним характером абразивного зношування у порівнянні з втомними та корозійно-механічними процесами, що підтверджується груповою діаграмою (рис. 4).

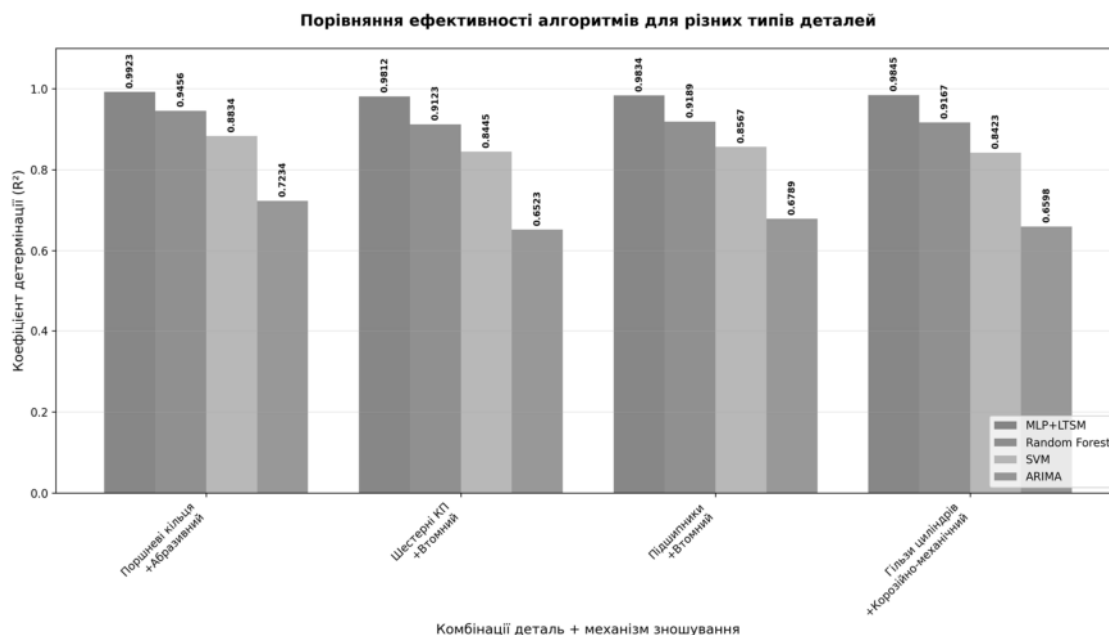


Рисунок 4 – Групова діаграма порівняння ефективності всіх алгоритмів для кожної комбінації деталь-механізм зношування за показником R^2

Джерело: розроблено з використанням робіт [5,17]

Таблиця 3 – Детальні результати ефективності алгоритмів для кожної комбінації деталь-механізм зношування

Комбінація	Алгоритм	R^2	RMSE	MAPE (%)
Поршневі кільця+Абразивний	MLP+LTSM	0.9923	8.12	2.45
	Random Forest	0.9456	14.23	4.76
	SVM	0.8834	19.87	7.23
	ARIMA	0.7234	28.45	10.12
Шестерні КП+Втомний	MLP+LTSM	0.9812	15.67	3.89
	Random Forest	0.9123	21.34	6.45
	SVM	0.8445	28.76	9.12
	ARIMA	0.6523	37.89	13.45
Підшипники+Втомний	MLP+LTSM	0.9834	11.23	3.12
	Random Forest	0.9189	17.45	5.67
	SVM	0.8567	23.12	8.45
	ARIMA	0.6789	31.67	11.89
Гільзи циліндрів+Корозійно-механічний	MLP+LTSM	0.9845	14.78	3.45
	Random Forest	0.9167	20.12	6.23
	SVM	0.8423	29.34	9.78
	ARIMA	0.6598	38.23	13.12

Джерело: розроблено авторами

Графік середньої абсолютної відсоткової помилки (рис. 5) демонструє, що всі значення MAPE для розробленої моделі знаходяться в діапазоні відмінної якості прогнозування ($< 4\%$), тоді як альтернативні методи показують значно гірші результати. Для шестерень коробки передач з втомним механізмом зношування модель має $R^2 = 0.9812$ з $RMSE = 15.67$ мкм та $MAPE = 3.89\%$. Це демонструє здатність ефективно моделювати складні циклічні процеси деградації зубчастих передач.



Рисунок 5 – Графік середньої абсолютної відсоткової помилки (MAPE) з індикаторами якості прогнозування

Джерело: розроблено авторами

Підшипники кочення з втомним зношуванням характеризувалися показниками $R^2 = 0.9834$, $RMSE = 11.23$ мкм, $MAPE = 3.12\%$, що корелює з їх високою твердістю

поверхні (650.8 HV) та мінімальним коефіцієнтом тертя (0.05). Про це свідчать діаграми розподілу матеріальних характеристик (рис. 6).

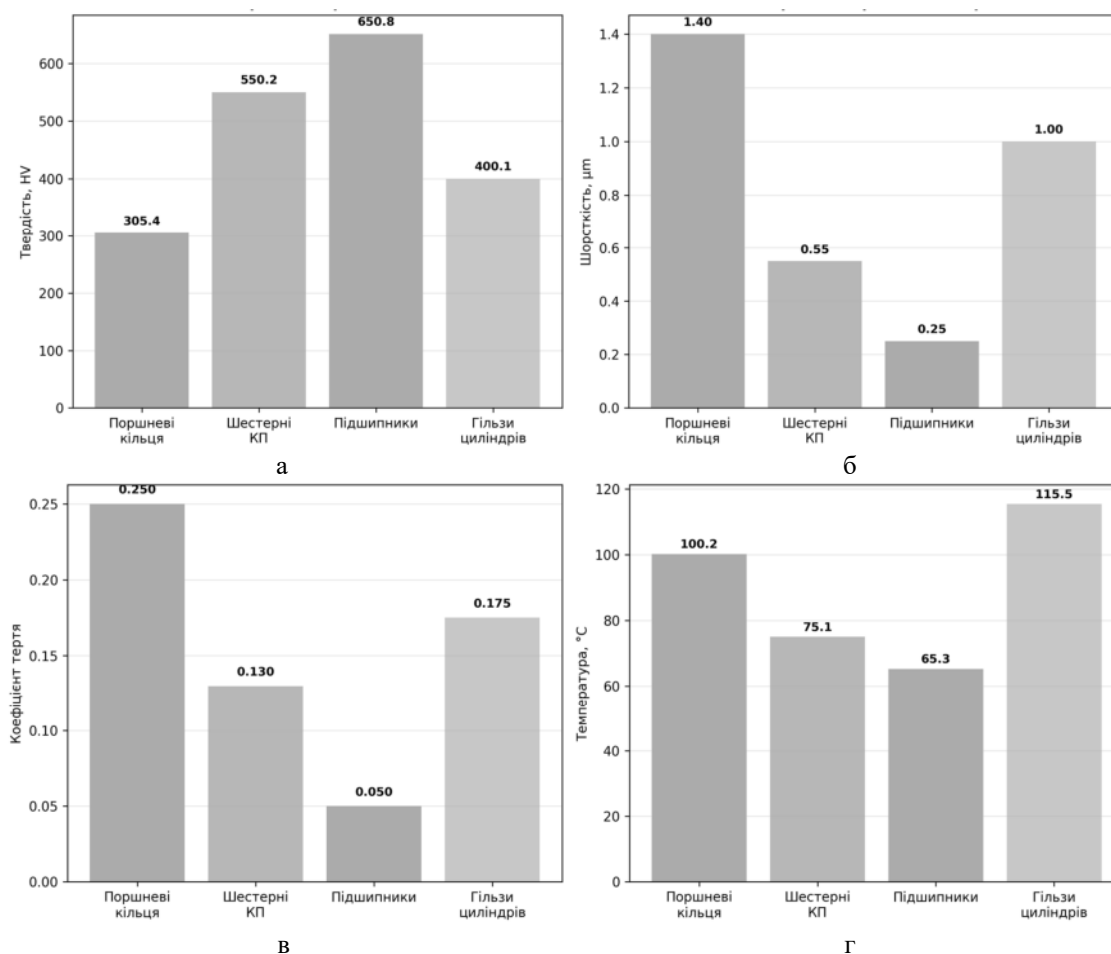


Рисунок 6 – Діаграми розподілу основних матеріальних характеристик досліджуваних типів деталей: твердість (а), шорсткість поверхні (б), коефіцієнт тертя (в), робоча температура (г)
Джерело: розроблено з використанням результатів роботи [9]

Динаміка процесу навчання (рис. 7) продемонструвала стабільну збіжність без ознак перенавчання, що підтверджується близькістю кривих навчання та валідації протягом усього процесу оптимізації. Теплова карта ефективності (рис. 4) наочно ілюструє переваги розробленого алгоритму для всіх досліджуваних комбінацій деталей-механізм зношування, де зелений колір відповідає найвищій ефективності.

Аналіз розподілу помилок найкращого алгоритму (рис. 6) показав, що найбільші відхилення прогнозів спостерігаються для шестерень коробки передач, що пов'язано зі складністю моделювання втомних процесів у зубчастих передачах під змінними навантаженнями. Водночас, графіки RMSE та MAPE демонструють стабільно низькі значення помилок для всіх типів деталей.

Порівняльний аналіз ефективності, представлений в табл. 4 та візуалізований на рис. 1, підтвердив переваги глибокого навчання для задач прогнозування зносу, де традиційні статистичні методи (ARIMA) показали втричі гіршу точність ($R^2 = 0.6789$) порівняно з розробленою нейромережевою системою. Ансамблеві методи (Random Forest) продемонстрували помірну ефективність ($R^2 = 0.9234$), проте поступилися нейронним мережам у точності прогнозування на 6.2%.

Стабільність результатів підтверджена крос-валідацією на незалежній тестовій вибірці, що складає 25% від загального обсягу даних (12,500 зразків). Відсутність значущих відмінностей між показниками на навчальній та тестовій вибірках. Зазначене демонструється динамікою навчання на рис. 3 та свідчить про високу узагальнюючу здатність моделі і її придатність для практичного застосування в умовах реальної експлуатації транспортної та сільськогосподарської техніки.

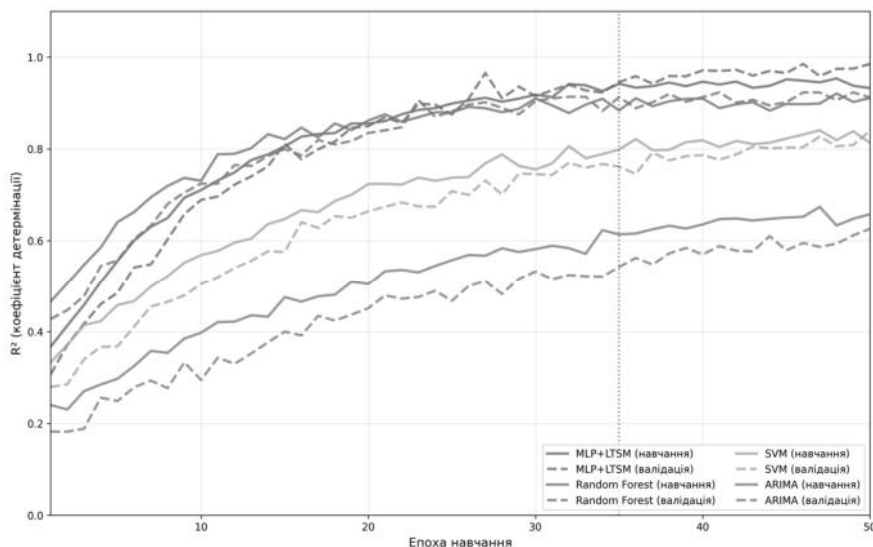


Рисунок 7 – Графіки зміни коефіцієнта детермінації в процесі навчання алгоритмів (суцільні лінії - навчальна вибірка, пунктирні - валідаційна)

Джерело: розроблено авторами

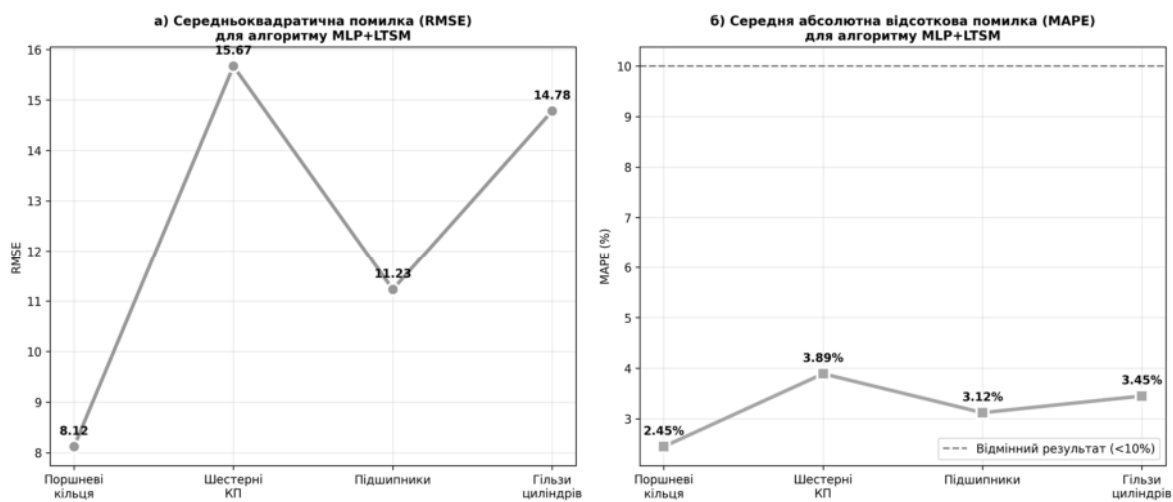


Рисунок 6 – Графіки розподілу помилок алгоритму MLP+LTSM по типах механічних деталей: RMSE (а) та MAPE (б)

Джерело: розроблено авторами на основі робіт [18,19]

Таблиця 4 – Порівняльні показники ефективності досліджених алгоритмів машинного навчання

Алгоритм	R^2 (коефіцієнт детермінації)	RMSE	MAPE (%)	Ранг
MLP+LTSM	0.9856	12.45	3.21	1
Random Forest	0.9234	18.76	5.87	2
SVM	0.8567	25.43	8.92	3
ARIMA	0.6789	34.21	12.45	4

Джерело: розроблено авторами

Оцінка практичної придатності розробленої нейромережевої системи для промислового застосування вимагає комплексного аналізу обчислювальних вимог, стійкості до реальних умов експлуатації та потенційних обмежень використання синтетичних даних. Компактна архітектура моделі з приблизно 12,000 параметрів забезпечує оптимальний баланс між точністю прогнозування та обчислювальною ефективністю, що критично важливо для інтеграції у системи реального часу.

Вимоги до обчислювальних ресурсів є мінімальними завдяки оптимізованій архітектурі нейронної мережі. Час навчання на повному наборі даних (50,000 зразків) не перевищує декількох хвилин на сучасному апаратному забезпеченні, а час інференції для одного прогнозу складає менше мілісекунди, що дозволяє реалізацію предиктивного обслуговування в режимі реального часу. Модель може ефективно функціонувати на стандартних промислових контролерах без необхідності спеціалізованого обладнання.

Аналіз стійкості до зашумлених даних показав високу робастність розробленої системи завдяки використанню батч-нормалізації та dropout регуляризації. Експериментальне додавання гаусівського шуму з коефіцієнтом варіації до 20% до вхідних параметрів призвело до зниження точності лише на 3-5%, що підтверджує придатність моделі для роботи в умовах реальних промислових даних з природними флуктуаціями сенсорних вимірювань.

Виявлено, що основним обмеженням дослідження є використання виключно синтетичних даних, генерованих на основі теоретичних моделей зношування. Хоча такий підхід дозволив створити великий репрезентативний набір даних та забезпечити контрольовані умови експерименту, реальні процеси зношування можуть включати додаткові фактори, що не враховані в синтетичних моделях. При цьому включається вплив мікроструктури матеріалу, локальні концентрації напружень, нерівномірність змащування та інші стохастичні фактори.

В той час валідація на реальних експериментальних даних залишається критично важливим етапом для підтвердження практичної ефективності розробленої системи. Тому рекомендується поетапне впровадження з початковою валідацією на обмеженій кількості реальних об'єктів та поступовим розширенням області застосування після підтвердження точності прогнозів.

Визначено, що можливості адаптації до різних типів деталей обмежені необхідністю переналаштування моделі для кожного нового типу матеріалу або механізму зношування. Результати показали значні відмінності в точності прогнозування для різних комбінацій деталей-механізм (від $R^2 = 0.9812$ до $R^2 = 0.9923$), що свідчить про специфічність навчених зв'язків. Показано, що для нових типів деталей може знадобитися збір додаткових навчальних даних та часткове переналаштування архітектури мережі.

Виявлено, що температурна стабільність алгоритмів машинного навчання в промислових умовах може становити додаткову проблему, особливо для мобільних систем діагностики транспортної та сільськогосподарської техніки. Проте, використання стандартизованих вхідних параметрів частково нівелює цю проблему, оскільки температурні ефекти враховуються в процесі нормалізації даних.

Інтеграційні виклики включають необхідність забезпечення якості вхідних даних від сенсорних систем, калібрування вимірювальних приладів та синхронізацію з існуючими системами технічного обслуговування транспортної та сільськогосподарської техніки. При цьому рекомендується розробка комплексної системи контролю якості даних з автоматичним виявленням аномальних вимірювань та процедурами їх корекції.

Доведено, що економічна ефективність впровадження розробленої системи значною мірою залежить від масштабу застосування та вартості незапланованих ремонтів. Попередні оцінки показують потенційну економію 15...25 % витрат на технічне обслуговування завдяки переходу від календарного до станового обслуговування. В той час остаточна оцінка вимагає детальних економічних розрахунків для конкретних умов експлуатації.

Інтеграція розробленої нейромережевої системи прогнозування зносу у сучасні кіберфізичні системи транспортної та сільськогосподарської техніки відкриває широкі можливості для реалізації концепції предиктивного обслуговування та створення інтелектуальних систем управління технічним станом. При цьому архітектура системи предиктивного обслуговування базується на багаторівневій структурі, що включає рівень сенсорів для збору первинних даних, рівень обробки та аналізу для реалізації нейромережевих алгоритмів, та рівень прийняття рішень для формування рекомендацій щодо технічного обслуговування техніки.

В процесі досліджень виявлено, що сенсорна підсистема повинна забезпечувати збір всіх дванадцяти вхідних параметрів, ідентифікованих як критичні для точного прогнозування зносу. Це включає датчики твердості для моніторингу зміни механічних властивостей поверхонь, профілометри для оцінки шорсткості, трибометричні датчики для вимірювання коефіцієнта тертя, датчики навантаження та швидкості для контролю експлуатаційних режимів, температурні сенсори для моніторингу теплового стану, а також хімічні аналізатори мастильних матеріалів для оцінки їх деградації.

Визначено, що реалізація системи вимагає високочастотного збору даних з частотою не менше 1 Гц для статичних параметрів та до 1000 Гц для динамічних характеристик вібрації та акустичних сигналів. Така інтенсивність збору даних потребує ефективних алгоритмів фільтрації та попередньої обробки сигналів для зменшення обчислювального навантаження на основну нейромережеву систему.

При інтеграції з існуючими системами управління технічним станом є потреба в розробці стандартизованих інтерфейсів обміну даними, сумісних з промисловими протоколами зв'язку такими як CAN-bus для транспортної та сільськогосподарської техніки, ISOBUS для сільськогосподарських машин, та Ethernet-базовані рішення для стаціонарного обладнання. Критично важливим є забезпечення кібербезпеки системи через використання шифрування даних та автентифікації пристроїв у мережі [13, 25].

В даній роботі архітектура обчислювальної підсистеми оптимізована для розгортання на периферійних пристроях (edge computing) для мінімізації затримок та зменшення навантаження на мережеві ресурси. Компактність моделі з 12,000 параметрами дозволяє реалізацію на промислових контролерах з обмеженими обчислювальними ресурсами або спеціалізованих мікропроцесорах з підтримкою нейромережевих обчислень.

Система управління рішеннями повинна забезпечувати автоматичне формування рекомендацій щодо технічного обслуговування на основі прогнозів залишкового ресурсу з урахуванням планових графіків роботи техніки, наявності запасних частин та трудових ресурсів. Інтеграція з ERP системами підприємств дозволить оптимізувати логістику запасних частин та планування ремонтних робіт транспортної та сільськогосподарської техніки.

Економічна ефективність впровадження системи обумовлена можливістю переходу від календарного до станового технічного обслуговування, що згідно з результатами досліджень може забезпечити зниження витрат на незаплановані ремонти на 20...30% та збільшення коефіцієнта готовності техніки на 5...8%. Показано, що

додатковий економічний ефект досягається через оптимізацію складських запасів запасних частин та зменшення простоїв обладнання.

Масштабованість системи забезпечується модульною архітектурою, що дозволяє поетапне впровадження починаючи з найбільш критичних вузлів, систем, агрегатів та поступове розширення на весь парк техніки. Також визначено, що хмарна інфраструктура може використовуватися для централізованого зберігання історичних даних, аналітики тенденцій та навчання моделей на агрегованих даних від множини об'єктів транспортної та сільськогосподарської техніки.

Перспективи розвитку методів інжинірингу із застосуванням нейронних мереж, включають інтеграцію з технологіями доповненої реальності для візуалізації прогнозів безпосередньо на обладнанні, використання технологій цифрових двійників для моделювання альтернативних стратегій обслуговування, та розробку адаптивних алгоритмів машинного навчання, здатних автоматично коригувати прогнози на основі накопичуваного досвіду експлуатації.

Висновки. 1. Показано, що розроблена архітектура глибокої нейронної мережі з чотирма повнозв'язними шарами (128-64-32-1 нейронів) забезпечує найвищу точність прогнозування зносу ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки серед досліджених методів машинного навчання з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.9856$, середньоквадратичною похибкою $RMSE = 12.45$ мкм та середньою абсолютною процентною похибкою $MAPE = 3.21\%$.

2. Порівняльний аналіз ефективності підтвердив переваги запропонованого підходу над альтернативними алгоритмами: Random Forest ($R^2 = 0.9234$), SVM ($R^2 = 0.8567$) та ARIMA ($R^2 = 0.6789$), що демонструє перевагу глибокого навчання для складних трибологічних задач прогнозування деградації матеріалів. Найкращі результати прогнозування отримані для поршневих кілець з абразивним механізмом зношування ($R^2 = 0.9923$, $RMSE = 8.12$ мкм, $MAPE = 2.45\%$), що пояснюється більшою передбачуваністю абразивних процесів у порівнянні з втомними та корозійно-механічними механізмами деградації.

Для всіх досліджуваних комбінацій деталей-механізм зношування (поршневі кільця, шестерні КП, підшипники, гільзи циліндрів) значення середньої абсолютної процентної похибки не перевищували 4%, що відповідає критеріям відмінної якості прогнозування згідно з міжнародними стандартами оцінки моделей машинного навчання.

3. Застосування комплексних методів регуляризації, включаючи батч-нормалізацію після кожного прихованого шару та dropout з коефіцієнтом 0.3, забезпечило стабільність навчання без ознак перенавчання та високу узагальнюючу здатність моделі на незалежних тестових даних. При цьому компактна архітектура з приблизно 12,000 параметрами забезпечує оптимальний баланс між точністю прогнозування та обчислювальною ефективністю з часом навчання, що не перевищує декількох хвилин, та часом інференції менше мілісекунди, що дозволяє реалізацію систем реального часу.

4. Аналіз практичної придатності підтвердив високу робастність системи до зашумлених промислових даних з можливістю збереження точності при додаванні гаусівського шуму з коефіцієнтом варіації до 20%, що забезпечує надійність функціонування в реальних умовах експлуатації. В той час розроблена концепція інтеграції у кіберфізичні системи передбачає багаторівневу архітектуру з сенсорною підсистемою для збору дванадцяти критичних параметрів, обчислювальною підсистемою для реалізації нейромережевих алгоритмів та системою управління рішеннями для оптимізації технічного обслуговування.

5. Економічна ефективність впровадження системи предиктивного обслуговування транспортної та сільськогосподарської техніки на основі розробленого алгоритму оцінюється в 20-30% зниження витрат на незаплановані ремонти та 5-8% збільшення коефіцієнта готовності техніки завдяки переходу від календарного до станового обслуговування. Основним обмеженням дослідження є використання виключно синтетичних даних, що вимагає подальшої валідації на реальних експериментальних даних, розширення спектра досліджуваних матеріалів та розробки адаптивних алгоритмів для автоматичного коригування прогнозів в умовах змінних експлуатаційних факторів.

Список літератури

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О. Кіберфізичний підхід при створенні транспортно-виробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3 (34). С. 331–343.
2. Головатий А. О., Чумак В. М., Манько Є. В. та ін. Вдосконалення математичного моделювання машинобудівних технологій для смарт-підприємств в системі машинного зору. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ*, 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 143–159. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159) (дата звернення: 01.09.2025).
3. Індус М. П., Левченко О. В. *Математичне моделювання технічних систем*. К. : Либідь, 2019. 312 с.
4. Zhang B., Zhang S., Li W. Bearing performance degradation assessment using long short-term memory recurrent network. *Computers in Industry*. 2019. Vol. 106. P. 14–29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.01> (дата звернення: 15.09.2025).
5. Singh K., Kumar S., Singh K. K. та ін. Computational data-driven based optimization of tribological performance of graphene filled glass fiber reinforced polymer composite using machine learning approach. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 66. P. 3838–3846. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.25> (дата звернення: 15.09.2025).
6. Susto G. A., Schirru A., Pampuri S. та ін. Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. Vol. 11(3). P. 812–820. URL: <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2349359> (дата звернення: 02.09.2025).
7. Shah R., Pai N., Thomas G. та ін. Machine Learning in Wear Prediction. *Journal of Tribology*. 2025. Vol. 147(4). Art. 040801. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066865> (дата звернення: 01.09.2025).
8. Wang X., Qin Q., Dai S. та ін. Machine Learning-Based Prediction of Mechanical Properties for Large Bearing Housing Castings. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 17. P. 4036. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18174036> (дата звернення: 18.08.2025).
9. Liu Y., Pan D., Zhang H. та ін. Remaining Useful Life Prediction of Bearing via a Double Attention-Based Deep Neural Network. 2022 *IEEE Smart World, Ubiquitous Intelligence & Computing, Scalable Computing & Communications, Digital Twin, Privacy Computing, Metaverse : матеріали міжнар. конф.* (м. Haikou, China, 15–18 грудня 2022 р.). Piscataway : IEEE, 2023. P. 92. URL: <https://doi.org/10.1109/SmartWorld-UIC-ATC-ScalCom-DigitalTwin-PriComp-Metaverse56740.2022.00092> (дата звернення: 12.09.2025).
10. Asmai S. A., Basari A. S. H., Shibghatullah A. S. та ін. Neural network prognostics model for industrial equipment maintenance. 2011 *11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS) : матеріали міжнар. конф.* (м. Melacca, Malaysia, 5–8 грудня 2011 р.). Piscataway : IEEE, 2011. P. 637–642. URL: <https://doi.org/10.1109/HIS.2011.6122176> (дата звернення: 18.08.2025).
11. Paredes J., Chávez D., Isa-Jara R. та ін. A hybrid machine learning algorithm approach to predictive maintenance tasks: A comparison with machine learning algorithms. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. P. 105137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105137> (дата звернення: 18.08.2025).
12. Kisten M., Ezugwu A. E., Olusanya M. O. Explainable Artificial Intelligence Model for Predictive Maintenance in Smart Agricultural Facilities. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 24348–24367. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365586> (дата звернення: 26.08.2025).
13. Tran K. P. Artificial Intelligence for Smart Manufacturing: Methods and Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21(16). P. 5584. URL: <https://doi.org/10.3390/s21165584> (дата звернення: 20.08.2025).
14. Mondal S., Goswami S. S. Machine learning applications in automotive engineering: Enhancing vehicle safety and performance. *Journal of Process Management New Technologies*. 2024. Vol. 12, № 1–2. P. 61–71. URL: <https://doi.org/10.5937/jpmnt12-50607> (дата звернення: 18.08.2025).
15. Jin L. Application of neural network method in engineering prediction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2083, № 4. Art. 042080. doi.org/10.1088/1742-6596/2083/4/042080 (дата звернення: 17.08.2025).

16. Ali Y. Artificial Intelligence Application in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis. *Artificial Intelligence – Emerging Trends and Applications*. IntechOpen, 2018. URL: doi.org/10.5772/intechopen.74932 (дата звернення: 2.09.2025).
17. Olivares D. C. Feature Engineering for Data-Based Predictive Maintenance : дис. ... докт. техн. наук : 08.00.11. Universidad de Sevilla, 2025. 154 с.
18. Baptista M., de Medeiros I. P., Malere J. P. та ін. Comparative case study of life usage and data-driven prognostics techniques using aircraft fault messages. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 87. P. 68–81. URL: https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.008 (дата звернення: 03.09.2025).
19. Ismoilov N., Jang S.-B. A Comparison of Regularization Techniques in Deep Neural Networks. *Symmetry*. 2018. Vol. 10, Iss. 11. Art. 648. URL: https://doi.org/10.3390/sym10110648 (дата звернення: 03.09.2025).
20. Chien C.-F., Ku C.-C., Lu Y.-Y. Ensemble learning for demand forecast of After-Market spare parts to empower data-driven value chain and an empirical study. *Computers & Industrial Engineering*. 2023. Vol. 184. Art. 109670. URL: https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109670 (дата звернення: 03.09.2025).
21. Dix M., Manca G., Fay A. Measuring the Robustness of Supervised ML Models to Label Noise in Industrial Data. 2025 *IEEE 8th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* : матеріали міжнар. конф. 2025. Art. 11087835. URL: https://doi.org/10.1109/ICPS65515.2025.11087835 (дата звернення: 03.09.2025).
22. Lisiecki A. Tribology and Surface Engineering. *Coatings*. 2019. Vol. 9, Iss. 10. Art. 663. URL: https://doi.org/10.3390/coatings9100663 (дата звернення: 30.08.2025).
23. Hofmann M., Neukart F., Bäck T. Artificial Intelligence and Data Science in the Automotive Industry. *arXiv*. 2017. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.01989 (дата звернення: 30.08.2025).
24. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. 2016 *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* : матеріали міжнар. конф. (м. Гонолулу, Гаваї, США, 5–8 січ. 2016 р.). IEEE, 2016. P. 3928–3937. URL: https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488 (дата звернення: 30.08.2025).

References

1. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Cyber-physical approach to the creation of transport and production systems. *Tsentralkoukrains'kyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 3(34), 331–343 [in Ukrainian].
2. Holovaty, A. O., Chumak, V. M., Man'ko, Ye. V., et al. (2025). Improvement of mathematical modeling of mechanical engineering technologies for smart enterprises in the machine vision system. *Tsentralkoukrains'kyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), part 2, 143–159. Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159 (accessed September 1, 2025).
3. Indus, M. P., & Levchenko, O. V. (2019). Mathematical modeling of technical systems. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
4. Zhang, B., Zhang, S., & Li, W. (2019). Bearing performance degradation assessment using long short-term memory recurrent network. *Computers in Industry*, 106, 14–29. doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.01 (accessed September 15, 2025).
5. Singh, K., Kumar, S., Singh, K. K., et al. (2022). Computational data-driven based optimization of tribological performance of graphene filled glass fiber reinforced polymer composite using machine learning approach. *Materials Today: Proceedings*, 66, 3838–3846. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.25 (accessed September 15, 2025).
6. Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., et al. (2015). Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 812–820. https://doi.org/10.1109/TII.2014.2349359 (accessed September 2, 2025).
7. Shah, R., Pai, N., Thomas, G., et al. (2025). Machine learning in wear prediction. *Journal of Tribology*, 147(4), Article 040801. https://doi.org/10.1115/1.4066865 (accessed September 1, 2025).
8. Wang, X., Qin, Q., Dai, S., et al. (2025). Machine learning-based prediction of mechanical properties for large bearing housing castings. *Materials*, 18(17), 4036. https://doi.org/10.3390/ma18174036 (accessed 18/08/2025).
9. Liu, Y., Pan, D., Zhang, H., et al. (2023). Remaining useful life prediction of bearing via a double attention-based deep neural network. In *2022 IEEE Smart World, Ubiquitous Intelligence & Computing, Scalable Computing & Communications, Digital Twin, Privacy Computing, Metaverse* (pp. 92). Piscataway: IEEE. https://doi.org/10.1109/SmartWorld-UIC-ATC-ScalCom-DigitalTwin-PriComp-Metaverse56740.2022.00092 (accessed September 12, 2025).
10. Asmai, S. A., Basari, A. S. H., Shibghatullah, A. S., et al. (2011). Neural network prognostics model for industrial equipment maintenance. In *2011 11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS)* (pp. 637–642). Piscataway: IEEE. https://doi.org/10.1109/HIS.2011.6122176 (accessed August 18, 2025).
11. Paredes, J., Chávez, D., Isa-Jara, R., et al. (2025). A hybrid machine learning algorithm approach to predictive maintenance tasks: A comparison with machine learning algorithms. *Results in Engineering*, 25, 105137. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105137 (accessed August 18, 2025).

12. Kisten, M., Ezugwu, A. E., & Olusanya, M. O. (2024). Explainable artificial intelligence model for predictive maintenance in smart agricultural facilities. *IEEE Access*, 12, 24348–24367. doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365586 (accessed August 26, 2025).
13. Tran, K. P. (2021). Artificial intelligence for smart manufacturing: Methods and applications. *Sensors*, 21(16), 5584. https://doi.org/10.3390/s21165584 (accessed August 20, 2025).
14. Mondal, S., & Goswami, S. S. (2024). Machine learning applications in automotive engineering: Enhancing vehicle safety and performance. *Journal of Process Management New Technologies*, 12(1–2), 61–71. https://doi.org/10.5937/jpmnt12-50607 (accessed August 18, 2025).
15. Jin, L. (2021). Application of neural network method in engineering prediction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2083(4), Article 042080. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2083/4/042080 (accessed August 17, 2025).
16. Ali, Y. (2018). Artificial intelligence application in machine condition monitoring and fault diagnosis. In *Artificial Intelligence – Emerging Trends and Applications*. IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.74932 (accessed September 2, 2025).
17. Olivares, D. C. (2025). Feature engineering for data-based predictive maintenance (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla) [in Spanish].
18. Baptista, M., de Medeiros, I. P., Malere, J. P., et al. (2016). Comparative case study of life usage and data-driven prognostics techniques using aircraft fault messages. *Computers in Industry*, 87, 68–81. https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.008 (accessed September 3, 2025).
19. Ismoilov, N., & Jang, S.-B. (2018). A comparison of regularization techniques in deep neural networks. *Symmetry*, 10(11), 648. https://doi.org/10.3390/sym10110648 (accessed September 3, 2025).
20. Chien, C.-F., Ku, C.-C., & Lu, Y.-Y. (2023). Ensemble learning for demand forecast of after-market spare parts to empower data-driven value chain and an empirical study. *Computers & Industrial Engineering*, 184, 109670. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109670 (accessed September 3, 2025).
21. Dix, M., Manca, G., & Fay, A. (2025). Measuring the robustness of supervised ML models to label noise in industrial data. In *2025 IEEE 8th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, Article 11087835. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICPS65515.2025.11087835 (accessed September 3, 2025).
22. Lisiecki, A. (2019). Tribology and surface engineering. *Coatings*, 9(10), 663. https://doi.org/10.3390/coatings9100663 (accessed August 30, 2025).
23. Hofmann, M., Neukart, F., & Bäck, T. (2017). Artificial intelligence and data science in the automotive industry. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.01989 (accessed August 30, 2025).
24. Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pp. 3928–3937). IEEE. https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488 (accessed August 30, 2025).

Vitaliy Chumak, Viktor Aulin, Prof., Dr. tech. sci., **Andrii Hrynkiv**, Sr. Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Wear Resistance and Reliability of Resource-Determining Parts of Transport and Agricultural Machinery by Engineering Methods Using Neural Networks

It is shown that in modern conditions of intensive development of Industry 4.0 and digitalization of machine-building processes, the problem of ensuring the reliability and durability of resource-determining parts of transport and agricultural machinery is of particular relevance. It is found that traditional approaches to predicting the technical condition of machines, based on calendar maintenance, do not meet modern requirements of economic efficiency and operational safety.

A methodology is proposed, which is based on the hybrid application of artificial neural networks - a multilayer perceptron (MLP) for identifying the dominant mechanisms of wear of machine parts and their conjugation and a recurrent long short-term memory network (LSTM) for predicting the dynamics of part degradation based on time series of operational parameters. It was determined that the use of synthetic data generated on the basis of physical models of wear allows overcoming the limitations associated with the lack of real operational data of machine components, systems and assemblies.

Validation of the developed algorithm on a representative data set (50,000 samples) demonstrated high prediction accuracy: coefficient of determination $R^2 = 0.98...0.99$, root mean square error $RMSE = 8.12...15.67 \mu m$, mean absolute percentage error $MAPE = 2.5...3.9\%$. These results confirm the prospects of integrating the proposed approach into cyber-physical systems of modern transport and agricultural machinery for implementing the concept of predictive maintenance.

wear prediction, artificial intelligence, MLP, LSTM, synthetic data, Archard model, predictive maintenance

Одержано (Received) 16.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

В. В. Яцун, доц., канд. техн. наук, **С. О. Джирма**, доц., канд. техн. наук, **О. О. Руденко**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: stas55871@ukr.net

Огляд конструкцій гумових футеровок барабанних кульових млинів та подальші перспективи їх розвитку

У роботі виконано узагальнюючий огляд сучасних конструкцій гумових футеровок, призначених для використання у барабанних кульових млинах, що експлуатуються в різних галузях промисловості для здійснення процесів дезінтеграції мінеральної сировини. Основну увагу приділено аналізу технічних рішень, спрямованих на підвищення зносостійкості, зниження маси футеровки, покращення енергоефективності процесу подрібнення та спрощення монтажу-демонтажу футерувальних елементів. Розглянуто конструктивні особливості гумових футерувальних плит традиційних та спеціальних конструкцій, описані їх галузі застосування в залежності від типорозмірів кульових млинів, геометричні характеристики та способи кріплення.

Особливу увагу приділено впливу конструктивних параметрів футеровки на експлуатаційні характеристики і технологічні показники кульових млинів, зокрема зносостійкість футеровки, енергоефективність процесу подрібнення, продуктивність. У межах огляду проаналізовано технічні рішення, реалізовані у футеровках провідних світових виробників, а також узагальнено актуальні тенденції подальшого вдосконалення конструкцій гумових футеровок. Надано висновки щодо ефективності різних типів конструкцій гумових футеровок залежно від умов експлуатації млинів, перспективності подальшого впровадження інноваційних матеріалів та адаптивних геометричних форм з метою оптимізації техніко-економічних показників млинів.

гумова футеровка, барабанні млини, кульове завантаження, довговічність, продуктивність

Постановка проблеми. В усьому світі переробці піддається велика кількість корисних копалин, так за даними U.S. Geological Survey, світовий видобуток залізної руди складає 2,3 млрд. тон за рік і поступово збільшується, на переробку якої витрачається до 10% всієї світової енергії [1]. Тільки в Україні щороку перероблюють більше 100 мільйонів тон мінеральної сировини для отримання залізної руди [2].

Більшість матеріалів для промислових потреб України отримується шляхом подрібнення в барабанних (кульових) млинах. Кульові млини необхідні і широко застосовуються для здійснення процесів дезінтеграції мінеральної сировини у таких галузях промисловості, як перероблення корисних копалин, виробництво цементу, хімічна промисловість, кераміка і виробництво добрив, для дроблення і подрібнення таких матеріалів, як руда, вапняк, кварц, вугілля тощо.

Процеси подрібнення є доволі енергоємними і супроводжуються інтенсивним зношуванням обладнання, особливо тих вузлів і деталей, які мають безпосередній контакт із матеріалом, що переробляється: футерування барабана, розвантажувальні решітки та мелючі тіла.

Одним з напрямків покращення показників роботи кульових млинів є застосування гумових футерувальних елементів циліндричної поверхні барабана.

Незважаючи на багаторічний досвід використання барабанних млинів із гумовою футеровкою, поки що не вдається ефективно застосовувати цей вид футерування в середньо- і великорозмірних млинах з кульовим завантаженням діаметром 80-125 мм. Головною причиною є те, що енергія взаємодії куль з футеруванням часто перевищує граничну міцність гуми. Зниження рівня енергії знижує ефективність

дроблення. Для вирішення цих протиріч потрібно створити нові або вдосконалити існуючі рішення гумових футеровок які зможуть працювати в умовах високих ударних навантажень.

Розробка нових конструктивних рішень гумових футеровок дасть можливість застосовувати їх більш ширше і покращувати такі основні показники кульових млинів: зменшення споживання електроенергії у зв'язку зі зниженням матеріалоемності, вмісту заліза в продуктах здрібнювання, підвищення продуктивності млинів за готовим продуктом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними роботами в області дослідження та конструювання гумових футеровок можна виділити роботи Лавендела, Девіса, Шалламаха, Мура, В.Н. Потураєва, В.І. Дирди, В.П. Надутого, Є.Ф. Чіжика, В.А. Настоящого та інших.

На основні техніко-економічні показники кульових млинів, а саме: продуктивність по готовому класу сировини ($\text{т/год} \cdot \text{м}^3$), питома витрата електроенергії (кВт/т матеріалу), витрата футерувальних елементів (г/т матеріалу), термін праці футеровки, суттєво впливає вибір раціональних параметрів футерувальних елементів.

Позитивний досвід застосування гумових плит став основою для робіт з удосконалення конструкцій футерувальних елементів, робочих поверхонь барабанів млинів, що дозволять ширше використовувати фізико-механічні властивості гум.

Існуючі традиційні конструкції успішно застосовувались і застосовуються в теперішній час в сучасних млинах діаметром до 3,6 м з кульовим завантаженням діаметром не більше 80 мм [3, 4, 5].

Для великорозмірних млинів з діаметром барабану 4,0-4,5 м, які працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-125 мм, було створено гумову футеровку з герметичними повітряними порожнинами, яка отримала назву оболонкова гумова футеровка [6, 7]. Вона знайшла широке застосування в млинах діаметром 4,5 м, що працюють з кульовим завантаженням 85-125 мм.

Для середньорозмірних млинів з діаметром барабану 3,6-4,2 м, які працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-100 мм, було створено гумову футеровку спеціальної конструкції, яка має повітряний зазор і податливі опорні ребра, вона отримала назву буферна гумова футеровка [8].

Останнім часом на гірничо-збагачувальних комбінатах України застосовуються нові оригінальні конструкції гумових футерувальних елементів виробництва ТОВ "НПП Валса ГТВ" (м. Біла Церква, Україна) відомі у практиці як "Плита – Хвиля", "G.M – Хвиля", "Плита – Ліфтер – Хвиля" [2, 9, 10]. Конструкції цих футеровок дозволили успішно застосовувати їх у млинах МШР 3,6х4,0 та МШЦ 3,6х5,5 з кульовим завантаженням діаметром 100 мм і 40 мм на першій, другій, третій стадії подрібнення ГЗК, на заміну металевих броне плит.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є виконати огляд існуючих конструкцій гумових футерувальних елементів циліндричної частини барабана кульових млинів, визначити можливості і границі їх застосування в залежності від діаметру барабана млина і діаметру кульового завантаження. Виявити недоліки існуючих конструкцій гумових футеровок і визначити шляхи та можливості покращення їх конструкцій або створення нових конструктивних рішень. Це дозволить значно ширше застосовувати гуми в якості футерувальних елементів кульових млинів.

Виклад основного матеріалу. На практиці при конструюванні футерувальних елементів притримуються основних вимог: футеровка повинна забезпечити заданий оптимальний режим руху мелючого середовища в барабані млина, збільшення

міжремонтних періодів (мати максимальну довговічність), простоту монтажно-демонтажних робіт по заміні футеровки, задану продуктивність млинів по готовому продукту.

В якості футеровки використовували різні матеріали: леговані сталі, зносостійкі чавуни, пластмаси, еластомери тощо. На практиці, спираючись на досвід використання футеровки в промислових млинах, в якості матеріалу найбільше розповсюдження отримали метали і гуми.

Зносостійкі гуми знайшли широке застосування в якості матеріалу футеровки, так як гуми мають ряд переваг перед металом: витримують значну кількість циклів навантаження без руйнування, мають високу зносостійкість в умовах ударного і ударно-абразивного зношування, питома вага у 6-7 разів менше питомої ваги сталі, стійкі до великої кількості хімічних сполук і температурам до $+90^{\circ}\text{C}$ [3, 11]. Гумові деталі не важко отримувати заданого розміру і форми, виконувати в них порожнини і ребра.

В більшості випадків застосування гумових футеровок має ряд переваг на відміну від застосування металевої футеровки:

- збільшення терміну праці і як наслідок збільшення міжремонтних періодів;
- зменшення затрат праці при виконанні перефутерувальних робіт, що в свою чергу зменшує виробничі втрати від простоїв обладнання;
- зменшення споживання електроенергії у зв'язку зі зниженням матеріалоємності;
- зниження вмісту заліза в продуктах подрібнення;
- підвищення продуктивності млинів за готовим продуктом.

Крім цього, застосування гуми для футерування кульових млинів знижує рівень шуму на 15-20 дБ в області особливо шкідливих для людини низьких і середніх частот, тим самим покращуючи умови праці обслуговуючого персоналу.

На початку 60-х років кріплення гумових футерувальних плит здійснювалося гумовими брусами (ліфтерами). Ця система кріплення отримала назву плита – ліфтер і навіть сьогодні знаходить широке застосування у сучасній техніці.

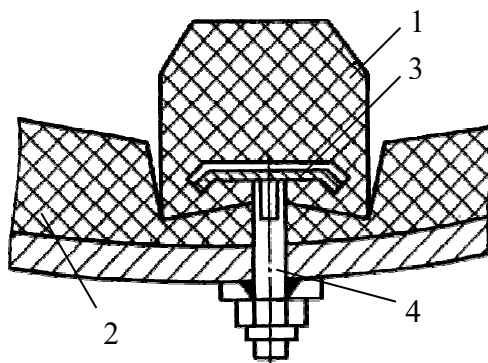
Наразі застосовуються в основному дві системи кріплення футерувальних плит ліфтерами, запропонованими шведськими фірмами "Skega" та "Trelleborg". За системою "Skega" кріплення здійснюється притисною скобою, що вставляється в Т-подібний проріз цільногумового ліфтера, який притискає футерувальну плиту по всій довжині (рис. 1) [4]. Кріплення за системою фірми "Trelleborg" здійснюється за допомогою металевої планки, яка прикріплюється до цільногумових ліфтерів клейовим способом у процесі вулканізації, та кріпильного болта (рис. 2) [5].

Ці футеровки отримали велике розповсюдження в колишньому СРСР, особливо на підприємствах по виробництву цементу та на другій і третій стадіях подрібнення гірничо-збагачувальних комбінатів.

Однак термін служби ліфтерів, за допомогою яких здійснюється кріплення гумових футерувальних плит, в 2-3 рази менший ніж термін служби самих плит.

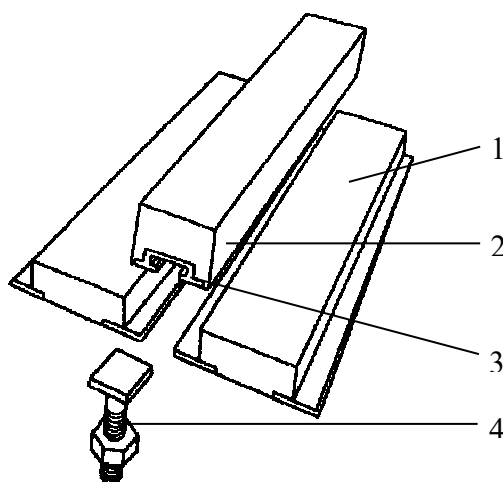
Невеликий термін служби ліфтерів зумовлений тим, що під час одностороннього обертання млина відбувається прискорене зношування частини ліфтера, яка виступає над поверхнею футерувальних плит. Основне навантаження припадає на бокову грань ліфтера, товщина гумового шару якої до краю кріпильного паза не перевищує 30 мм. Через інтенсивний знос цього шару кріпильні елементи (ліфтери) поступово втрачають свою міцність і потребують заміни.

Дані обставини потребують використовувати з одним комплектом плит 2-3 комплекти ліфтерів. Необхідність частої заміни ліфтерів і вимушені зупинки млина на перефутерувальні роботи збільшують витрати на експлуатацію обладнання знижуючи його загальну ефективність використання.



1 – цілногумовий ліфтер; 2 - футерувальні плити; 3 – притискна скоба; 4 – кріпильний болт.
Рисунок 1 – Конструкція гумового футерування фірми "Skega" (Країна Швеція).

Джерело: розроблено авторами на підставі [4]



1 – футерувальні плити; 2 - цілногумовий ліфтер; 3 – притискна скоба; 4 – кріпильний болт.
Рисунок 2 – Конструкція гумового футерування фірми "Trelleborg" (Країна Швеція)

Джерело: розроблено авторами на підставі [5]

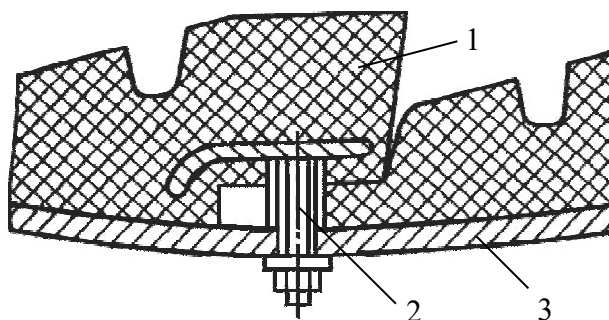
Враховуючи дані обставини, конструктори гумових футерувальних плит пішли шляхом створення гумових футерувальних елементів без різких виступаючих частин.

Одноелементна гумова футеровка без різких виступаючих частин представлена на рис. 3 [12]. Кріпильні елементи знаходяться в тілі футерувальної плити. Це запобігає їх руйнуванню поки не відбудеться зношення футеровки по всій площині, спрощує її конструкцію. Даний вид футерувальних плит широко застосовувався на цементних заводах і гірничо-збагачувальних комбінатах СРСР замість металевих бронеплит відповідної товщини в млинах діаметром до 3,6 м з мелючими кулями діаметром до 80 мм.

Розглянуті конструкції гумових футеровок пробували застосовувати в млинах більшого діаметру, а саме 3,6-4,5 м з кульовим завантаженням 100-125 мм. Але ці спроби були невдалі. Ударні навантаження металевих куль перевищують граничну міцність гумових футеровок (гуми), що викликало швидке зношування футеровки її руйнування і, як наслідок передачу ударних навантажень на корпус барабану кульових млинів.

Наступним кроком у створенні і більш широкого застосування гумових футерувальних елементів в умовах підвищених ударних навантажень (у

великорозмірних млинах) було запропоновано для зниження ударного імпульсу вводити в конструкцію гумової футеровки герметичних повітряних порожнин.

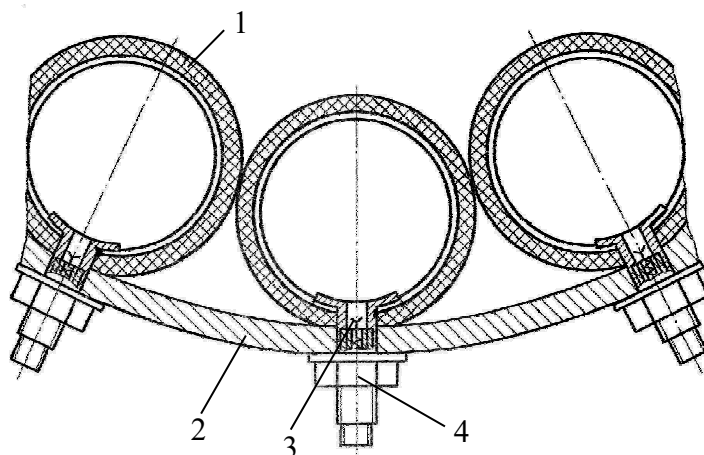


1 – гумова футерувальна плита; 2 – елементи кріплення; 3 – барабан кульового млина

Рисунок 3 – Одноелементна гумова футеровка

Джерело: розроблено авторами на підставі [12]

Основою для створення гумових футеровок, здатних працювати в умовах підвищених ударних навантажень (великорозмірних млинах), стала гумова футеровка, що представляє собою герметичну оболонку заповнену повітрям і обладнана ніпелем для його підводу (рис. 4) [7].



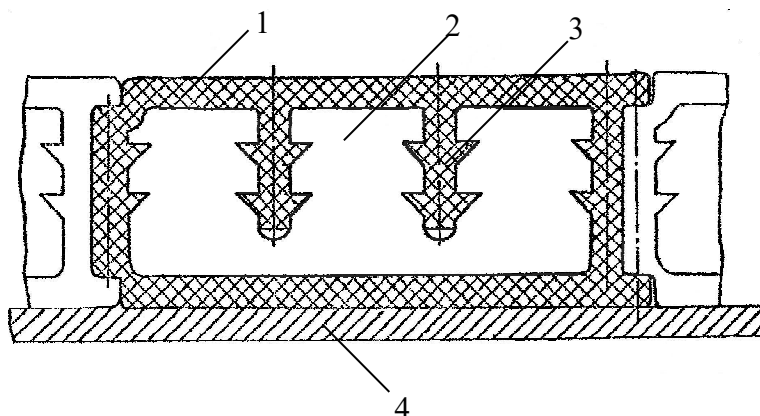
1 – герметична оболонка; 2 – барабан млина; 3 – ніпель для підводу повітря; 4 - елементи кріплення

Рисунок 4 – Гумова футеровка барабанів млинів.

Джерело: розроблено авторами на підставі [6]

За цим принципом створено гаму конструкцій гумових футеровок для великорозмірних млинів, що можуть працювати в умовах підвищених ударних навантажень. Основні конструкції створені провідними вченими: В.Н. Потураєв, В.П. Надутий, О.О. Тарасенко, А.А. Взорв, Е.Ф. Чижик, В.А. Настоящий, А.Г. Червоненко та іншими приведені на рис. 5, 6, 7 [13-15].

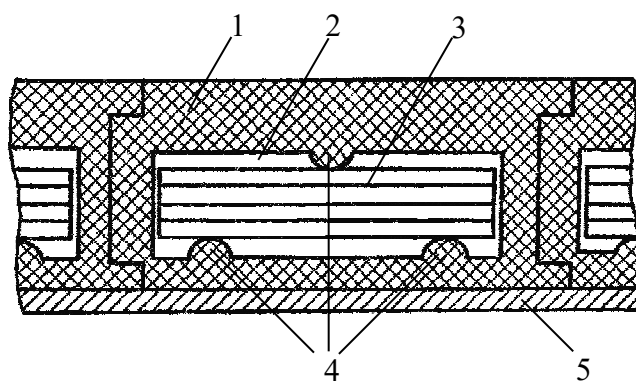
Для захисту циліндричної частини барабану великорозмірних кульових млинів діаметром 4,5 м застосовано оболонкову гумову футеровку (рис. 8). Вона представляє собою набір однотипних гумових елементів з герметичними повітряними порожнинами. Оптимальні геометричні параметри оболонкових гумових футерувальних елементів визначено на основі виконаних досліджень в роботі [8].



1 – футерувальна плита; 2 – повітряна порожнина; 3 – консольні ребра жорсткості;
4 – поверхня, що захищається

Рисунок 5 – Гумова футеровка барабанів млинів.

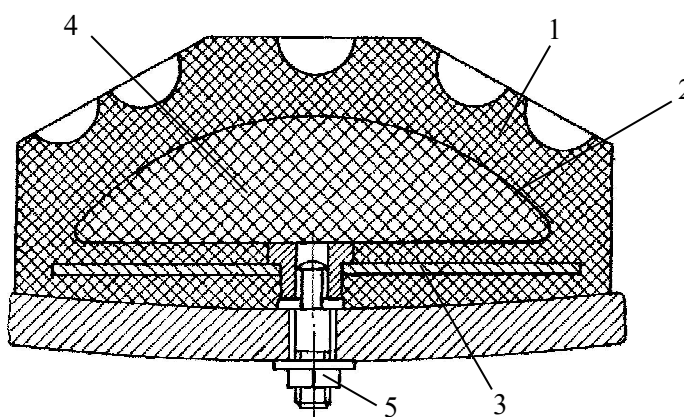
Джерело: розроблено авторами на підставі [13]



1 – футерувальна плита; 2 – повітряна порожнина; 3 – багатошарова пластина; 4 – повздовжні ребра;
5 – поверхня, що захищається

Рисунок 6 – Гумова футеровка барабанів млинів.

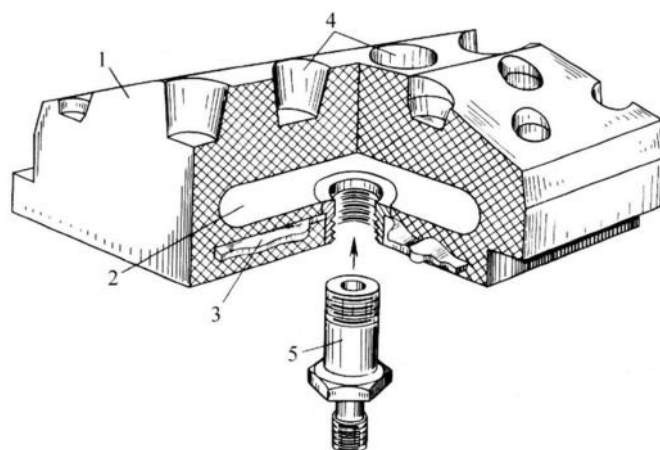
Джерело: розроблено авторами на підставі [14]



1 – гумова плита; 2 – порожнина; 3 – кріпильна планка; 4 – вкладиш з пористої гуми;
5 – кріпильні елементи

Рисунок 7 – Гумова футеровка барабанів млинів.

Джерело: розроблено авторами на підставі [15]



1 – гумова плита, 2 – герметична повітряна порожнина, 3 – кріпильна планка,
4 – поглиблення в гумі, 5 – кріпильний болт з клапаном

Рисунок 8 – Оболонкова гумова футеровка.

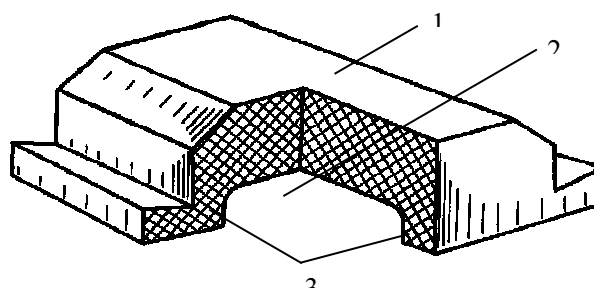
Джерело: розроблено авторами на підставі [8]

Оболонкова футеровка добре зарекомендувала себе в млинах діаметром 4-4,5 м, які працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-125 мм і проблема застосування гумової футеровки в великорозмірних млинах була вирішена.

Однак застосування оболонкової футеровки в середньорозмірних млинах діаметром 3,6-4,2 м було не доцільно, так як введення в тіло футеровки герметичної повітряної порожнини призвело до збільшення загальної товщини гумової плити, що зменшує корисний робочий об'єм барабана млина. При виготовленні гумових оболонкових плит для млинів діаметром 3,6-4,2 м висотою не більше висоти металевих бронеплит, суттєво знижується запас товщини шару гуми над повітряною порожниною на зношування.

Подальшим розвитком гумових футерувальних елементів для кульових млинів стала буферна гумова футеровка, яка поєднала в собі переваги оболонкових і традиційних гумових плит та представляє собою набір однотипних гумових пластин. По периметру цих пластин розташовані опорні ребра, які утворюють повітряний зазор (рис. 9) [7, 16].

Конструкція даної футеровки зробила можливим застосування гумових футерувальних елементів в млинах діаметром 3,6-4,2 м, що працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-100 мм. Загальна висота буферної футеровки не перевищує висоту металевих футерувальних елементів для кульових млинів діаметром 3,6-4,2 м, що дозволило зберегти корисний об'єм кульових млинів, а система кріплення дозволяє встановлювати її в барабан без його переробки.



1 – гумова плита, 2 – повітряний зазор, 3 – опорні ребра

Рисунок 9 – Буферна гумова футеровка.

Джерело: розроблено авторами на підставі [7, 16]

В сучасній практиці на основі хвильової теорії абразивно-втомного зношування гумових футеровок [19] вченими, механіками і технологами створено гамму нових одноелементних футеровок "Плита – Хвиля", "G.M – Хвиля", "Плита – Ліфтер – Хвиля" (рис. 10) [2, 9, 10].

Футеровки даної конструкції застосовуються на II і III стадіях подрібнення на гірничо-збагачувальних комбінатах Полтавський ГЗК (м. Полтава) і Північний ГЗК (м. Кривий Ріг), показали гарні результати їх використання [2, 17].

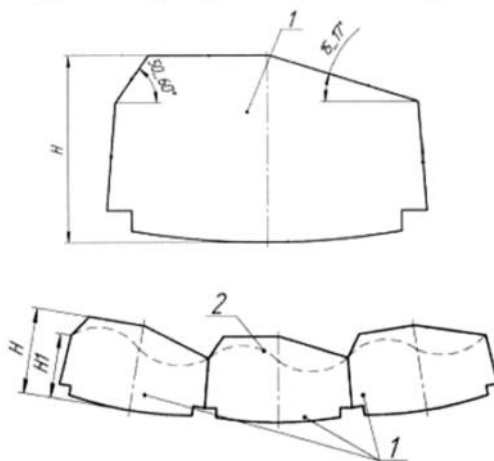
В останні роки гумову футеровку типу "Хвиля" збільшеної висоти виробництва ТОВ "НПП Валса ГТВ" (м. Біла церква, Україна) застосовано в млинах I стадії подрібнення діаметром 3,6 м з кулями діаметром 100-125 мм і кусками породи розміром до 25 мм (рис. 11). Дана футеровка показала гарні результати застосування, а саме збільшення довговічності і надійності, зменшення витрат на заміну футеровки, збільшення продуктивності по готовому класу на 10-12% [17, 18].

Висновки. Світовий досвід застосування гумової футеровки в барабанних кульових млинах дозволяє зробити висновок, що покращуються не тільки експлуатаційні, а і технологічні показники млинів.

Застосування гумових футеровок в якості альтернативи традиційним металевим плитам демонструє суттєві переваги в експлуатації барабанних млинів. Зокрема, відзначається зниження енергоспоживання, зменшення питомої витрати мелючих тіл (куль), підвищення продуктивності (збільшення готового матеріалу необхідної фракції), а також збільшення ресурсу служби футерувальних елементів.

У межах цієї роботи проаналізовано найпоширеніші типи футеровок, що використовуються в барабанних млинах. Більшість із них активно застосовуються на практиці, проходять модернізацію й залишаються предметом технічних і наукових досліджень. У зв'язку з цим, питання вдосконалення футерувальних систем набуває особливої актуальності як у виробничому середовищі, так і в науково-дослідницькому контексті.

Попри активне впровадження гумових футеровок, фізико-механічні характеристики гуми та її вплив на процес подрібнення залишаються вивченими не повною мірою. Це свідчить про наявність значного потенціалу для подальшого розвитку та оптимізації конструкцій футеровок з еластомірних матеріалів.



1 – гумова плита, 2 – хвиляста форма поверхні, що утворюється під час роботи кульового млина

Рисунок 10 – Гумова футеровка типу "Хвиля"

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Для розширення сфери застосування гумових футеровок необхідно зосередити увагу на розробці конструкцій, які поєднуюватимуть в собі інноваційність, технологічність і доступність для серійного виробництва в умовах українського машинобудування. Такі рішення повинні враховувати особливості роботи млинів у різних режимах, забезпечувати ефективний захист внутрішніх поверхонь барабанів і сприяти зниженню загальних експлуатаційних витрат.

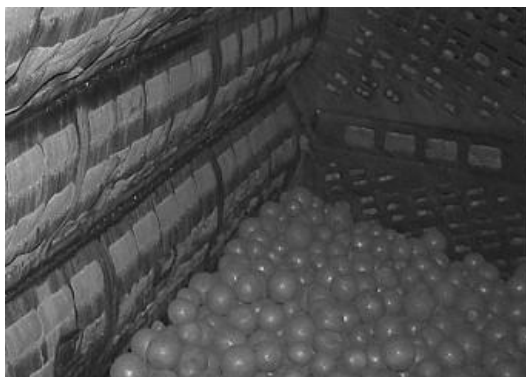


Рисунок 11 – Гумова футеровка "G.M-Хвиля" встановлена у млині І-ої стадії подрібнення Південного ГЗК (м. Кривий Ріг) млин діаметром 3,6 м кулі діаметром 100 мм.

Джерело: розроблено авторами на підставі [17]

З урахуванням сучасних тенденцій, перспективними напрямками розвитку є впровадження полімерних композитів із заданими характеристиками, комп'ютерне моделювання процесів зносу та навантаження, а також удосконалення методів розрахунку і проектування гумової футеровки.

Список літератури

1. Цаніді І.М., Калганков Є.В. Захисні футерівки барабанних млинів: сучасний стан та перспективи розвитку. *Геотехнічна механіка*. 2017. №133. С. 75-80.
2. Калганков Є.В. Гумова футеровка та її місце у дезінтеграції мінеральної сировини. *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості та транспорту 2020: матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ 24-25 квіт. 2020 р.* Дніпропетровськ: ДТУ, 2020. С. 168-173.
3. Джирма С.О., Настоящий В.А., Півнева О.В. Перспективи використання стійкої проти спрацювання гуми в якості робочих поверхонь технологічного і транспортного обладнання. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2007. Вип. 18. С. 188-191.
4. Ersmark E. Skega Gummipanzerung fur Kugel. Peble und Stabrohmuhlen. Sweden, 1977. – P. 12.
5. Trelleborg Mill Linings. Trelleborg. Sweden, 1979. – P. 14.
6. А. с. 706114 СРСР, В О2 С 17/22. Футеровка барабанного млина / А.А. Тарасенко, Г.П. Хабло, А.А. Взорев, Е.Ф. Чирик, В.А. Настоящий. – №2652138 заяв. 31.07.78; опубл. 30.12.79, Бюл. №48.
7. Футерівка робочих поверхонь подрібнювального устаткування: пат. 65103А Україна. №2003054971 ; заявл. 30.05.2023 ; опубл. 15.03.2004, Бюл. № 3. – 3 с.
8. Настоящий В.А. Вибір параметрів і розробка конструкції гумових футеровок великорозмірних рудорозмольних млинів: дис... канд. техн. наук: 05.05.06 / Кіровоградський інститут сільськогосподарського машинобудування. Кіровоград, 1986. 187 с.
9. Футерівка барабанного млина: пат. 78397 Україна. №u201214920; заяв. 26.12.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. – 6 с.
10. Футерівка барабанного млина: пат. 105550 Україна. №u20121509188; заяв. 24.09.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6. – 4 с.
11. Каткова І.О., Тарасенко О.А., Чеберячко І.М. Використання гуми, як конструкційного матеріалу. *Вибірці в техніці і технології*. 1998. №3. С. 66-67.
12. Надольний Г.Є., Настоящий В.А., Чирик Е.Ф. Проектування робочих поверхонь механічного устаткування для дроблення, змільчення та сортування мінеральних матеріалів: навч. посіб. Київ: НМК ВО, 1993. 128 с.
13. А. с. 706114 СРСР, В О2 С 17/22. Футеровка барабанного млина / О.А. Тарасенко, Г.П. Хабло, А.А. Взорев, Е.Ф. Чирик, В.А. Настоящий – №2652138 заяв. 31.07.78; опубл. 30.12.79, Бюл. №48.
14. А. с. 963553 СРСР, В О2 С 17/22. Футеровка, переважно, барабанів млинів / А.Г. Червоненко, В.П. Надутый, Ю.Я. Ободан, Е.Ф. Чирик – №3285942 заяв. 28.04.81; опубл. 07.10.82, Бюл. №37.
15. А. с. 1435293 СРСР, В О2 С 17/22 Футеровка барабанних млинів / Е.Г. Баранов, А.А. Тарасенко, В.А. Настоящий, Е.Ф. Чирик, Л.И. Данилов, Е.А. Тарасенко, Т.Н. Настоящая, Б.И. Коротких – №4224281 заяв. 07.04.87; опубл. 07.11.88, Бюл. №41.
16. Джирма С.О., Васильев О.С., Таран В.В. Розроблення конструкцій буферних гумових футеровок барабанних і трубних млинів та результати випробування моделей. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2003. – Вип. 11. – С. 26-29.
17. Калганков Є. В. Деякі питання ресурсо- та енергозбереження при подрібненні мінеральної сировини у барабанних кульових млинах. *Геотехнічна механіка*. 2020. №151. С. 138-149. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.138> (дата звернення: 08.04.2025).
18. Kalhankov Ye.V., Lysytsia M.I., Ahaltsov H.M., Cherniy O.A. Reliability prediction for the rubber lining operating under extreme conditions. *Geo-Technical Mechanics*. 2022. №160, С. 96-105. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2022.160.096> (дата звернення: 08.04.2025).
19. Bulat A.F., Dyrdy V.I., Kalgankov Ye.V. Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. №3. С. 39-47.

References

1. Tsanidi, I. M., & Kalgankov, Ye. V. (2017). *Protective linings of drum mills: Current state and development prospects. Geotechnical Mechanics*, (133), 75–80 [in Ukrainian].
2. Kalgankov, Ye. V. (2020). *Rubber lining and its place in the disintegration of mineral raw materials. In Modern Innovative Technologies for Training Engineering Personnel for the Mining Industry and Transport 2020: Proceedings of the International Conference (Dnipro, April 24–25, 2020)* (pp. 168–173). Dnipro: DTU [in Ukrainian].
3. Dzhyrma, S. O., Nastoishchyi, V. A., & Pivnieva, O. V. (2007). *Prospects of using wear-resistant rubber as working surfaces of technological and transport equipment. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (18), 188–191 [in Ukrainian].
4. Ersmark, E. (1977). *Skega Gummipanzerung für Kugel-, Peble- und Stabrohmühlen* (p. 12). Sweden.
5. Trelleborg. (1979). *Trelleborg Mill Linings* (p. 14). Sweden.
6. Tarasenko, A. A., Khablo, H. P., Vzorov, A. A., Chyzhyk, E. F., & Nastoishchyi, V. A. (1979). *Lining of a drum mill*. Author's certificate 706114 USSR, V O2 C 17/22, No. 2652138; filed 31.07.1978; published 30.12.1979, Bulletin No. 48 [in Russian].
7. *Lining of working surfaces of grinding equipment*: Patent 65103A Ukraine, No. 2003054971; filed 30.05.2003; published 15.03.2004, Bulletin No. 3 [in Ukrainian].
8. Nastoishchyi, V. A. (1986). *Selection of parameters and design development of rubber linings for large-size ore-grinding mills* (Candidate's thesis). Kirovohrad Institute of Agricultural Engineering, 187 p. [in Ukrainian].
9. *Lining of a drum mill*: Patent 78397 Ukraine, No. u201214920; filed 26.12.2012; published 11.03.2013, Bulletin No. 5 [in Ukrainian].
10. *Lining of a drum mill*: Patent 105550 Ukraine, No. u201509188; filed 24.09.2015; published 25.03.2016, Bulletin No. 6 [in Ukrainian].
11. Katkova, I. O., Tarasenko, O. A., & Cheberiachko, I. M. (1998). *Use of rubber as a structural material. Vibrations in Engineering and Technology*, (3), 66–67 [in Ukrainian].
12. Nadolnyi, H. Ye., Nastoishchyi, V. A., & Chyzhyk, E. F. (1993). *Design of working surfaces of mechanical equipment for crushing, grinding, and sorting mineral materials: Textbook*. Kyiv: NMK VO, 128 p. [in Ukrainian].
13. Tarasenko, O. A., Khablo, H. P., Vzorov, A. A., Chyzhyk, E. F., & Nastoishchyi, V. A. (1979). *Lining of a drum mill*. Author's certificate 706114 USSR, V O2 C 17/22, No. 2652138; filed 31.07.1978; published 30.12.1979, Bulletin No. 48 [duplicate; in Russian].
14. Chervonenko, A. H., Nadutyi, V. P., Obodan, Yu. Ya., & Chyzhyk, E. F. (1982). *Lining, mainly for mill drums*. Author's certificate 963553 USSR, V O2 C 17/22, No. 3285942; filed 28.04.1981; published 07.10.1982, Bulletin No. 37 [in Russian].
15. Baranov, E. G., Tarasenko, A. A., Nastoishchyi, V. A., Chyzhyk, E. F., Danilov, L. I., Tarasenko, E. A., Nastoishchaia, T. N., & Korotkikh, B. I. (1988). *Lining of drum mills*. Author's certificate 1435293 USSR, V O2 C 17/22, No. 4224281; filed 07.04.1987; published 07.11.1988, Bulletin No. 41 [in Russian].
16. Dzhyrma, S. O., Vasyliiev, O. S., & Taran, V. V. (2003). *Development of designs of buffer rubber linings of drum and tube mills and results of model tests. Collection of Scientific Papers (Mechanical Engineering, Construction)*, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk, (11), 26–29 [in Ukrainian].
17. Kalgankov, Ye. V. (2020). *Some issues of resource and energy saving in mineral raw material grinding in drum ball mills. Geotechnical Mechanics*, (151), 138–149. <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.138> [in Ukrainian].
18. Kalkhankov, Ye. V., Lysytsia, M. I., Ahaltsov, H. M., & Cherniy, O. A. (2022). Reliability prediction for the rubber lining operating under extreme conditions. *Geo-Technical Mechanics*, (160), 96–105. doi.org/10.15407/geotm2022.160.096
19. Bulat, A. F., Dyrda, V. I., & Kalgankov, Ye. V. (2018). Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 39–47 [in Ukrainian].

Volodymyr Yatsun, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Stanislav Dzhyrma**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Rudenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Overview of the Rubber Linings Designs of Drum Ball Mills and Further Prospects for Their Development

The work provides a general overview of modern designs of rubber linings intended for use in drum ball mills operated in various industries for the disintegration of mineral raw materials. The main attention is paid to the analysis of technical solutions aimed at increasing wear resistance, reducing the weight of the lining, improving the energy efficiency of the grinding process and simplifying the assembly and disassembly of lining elements. The design features of rubber lining plates of traditional and special designs are considered, their areas of application are described depending on the standard sizes of ball mills, geometric characteristics, and methods of fastening.

Particular attention is paid to the influence of the design parameters of the lining on the operational characteristics and technological indicators of ball mills, in particular the wear resistance of the lining, the energy efficiency of the grinding process, and productivity. The paper analyses the technical solutions implemented in the linings of leading world manufacturers, summarizes the current trends in further improving the designs of rubber linings. Conclusions are provided on the effectiveness of different types of rubber lining designs depending on the operating conditions of the mills, the prospects for further implementation of innovative materials and adaptive geometric shapes in order to optimise the technical and economic indicators of the mills.

rubber lining, drum mills, ball loading, durability, productivity

Одержано (Received) 28.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 01.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

УДК 621.867.84

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.299-307](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.299-307)

В. В. Яцун, проф., канд. техн. наук, **І. О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук,
Г. Д. Портнов, доц., канд. техн. наук, **О. В. Горпинченко**, доц., канд. екон. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: yatsun@i.ua

Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу в зоні завантаження на вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії

Приведені основні результати досліджень з розробки та впровадження в виробництво новітніх технічних засобів та технологій у галузі систем трубопровідного вібропневмотранспорту. Наукова новизна та практична значимість робіт полягає в можливості значно підвищити ефективність технологічних процесів за рахунок використання отриманих результатів. У статті досліджуються характеристики руху сипкого кускового матеріалу на завантажувальній вібраційно-розгінній ділянці транспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії.

Вібраційно-розгінна ділянка, ділянка завантаження, транспортний трубопровід, аеросуміш

Постановка проблеми. Процес трубопровідного транспортування сипких кускових матеріалів стисненим повітрям надзвичайно складний. Закономірності руху сипких кускових матеріалів на розгінній ділянці транспортного трубопроводу визначається багатьма факторами, які залежать від конструкції і режиму роботи пневмотранспортної системи, властивостей матеріалу і особливостей його взаємодії з вантажонесучим транспортним органом. Не дивлячись на значне розширення в останні роки досліджень з механіки руху сипких кускових матеріалів отримані результати не мали помітного впливу на розвиток розрахункових методів вібропневмотранспортування. В ІГТМ НАН України спільно з ЦНТУ розроблено принципово новий тип вібраційно-пневмотранспортної машини з примусовим розгоном матеріалу в зоні завантаження, яка спроможна транспортувати сипкий кусковий матеріал на відстані до 2,5 км по трубопроводу з продуктивністю до 120 м³/год при габаритах машини 1,2 x 0,7 x 2,5 м. Удосконаленню конструкції машини на основі дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу в зоні завантаження на вібраційно-розгінній ділянці присвячена дана робота [2, 12-14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома постановка задачі спільної дії вібрації і повітряного потоку на шар насипного матеріалу. Так, [5, 6] розглядається механіка руху матеріалу у вигляді одиничних частинок на вантажонесучому органі вібраційно-пневмотранспортного пристрою. Одиничні частинки переміщуються під дією аеродинамічної сили і вібраційного впливу у вигляді шару матеріалу з опорами, що викликані статистичним характером руху частинок шару, взаємним тертям між частинками і наявністю повітряного середовища. Процес представлено в неінерціальних системах координат, що обумовлює існування сил інерції. Враховується етап ковзання частинок по вантажонесучому органу. В постановці задачі є ряд допущень, зокрема більш детально враховано вплив вібрації при спрощеній схемі аеродинамічного впливу. Підчас руху одиничних частинок з підкиданням без ковзання, коли останні знаходяться на робочому органі лиш в деякі ізольовані моменти часу,

зручніше використовувати нерухомі системи відрахунку, в яких траєкторія руху частинки має простий вигляд. В [6, 11] досліджувався рух одиначної частинки в транспортному трубопроводі, але процес відриву і польоту частинки розглядався для горизонтальної ділянки в залежності від швидкості витання частинки, що не зовсім точно пояснює механіку руху частинки в горизонтальному трубопроводі.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження вібраційного впливу на пневмотранспортування сипучого кускового матеріалу в зоні завантаження на вібраційно-розгінній ділянці.

Виклад основного матеріалу. Для визначення закону руху сипучого кускового матеріалу на завантажувальній вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії (ВПМЦ) (рисунок 1), матеріал представлено одиначними частинками та приймалися наступні припущення: швидкість повітряного потоку по довжині трубопроводу на вібраційно-розгінній ділянці постійна, одиначні частинки мають сферичну форму, при падінні частинки на вантажонесучий орган машини відбувається не цілком пружний удар, тривалість удару порівняно однакова з періодом коливань вібралотка.

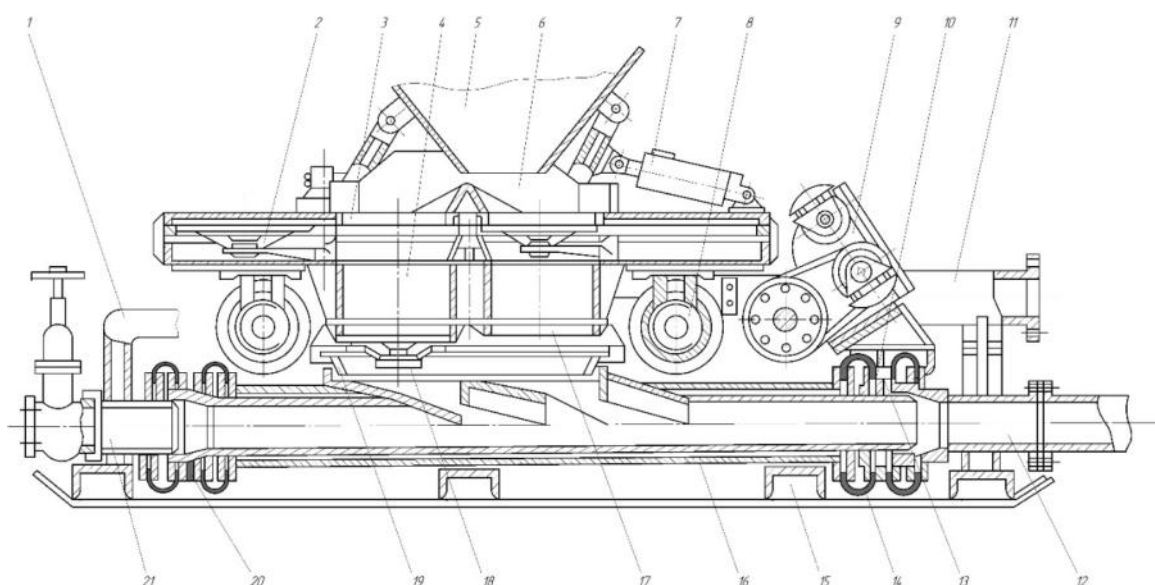


Рисунок 1 – Вібраційно-пневмотранспортна машина циклічної дії:

- 1 – повітряно-подаючий трубопровід; 2, 19 – затвори; 3, 18 – завантажувальні та розвантажувальні вікна;
4 – камера; 5 – приймально-дозуючий пристрій; 6 – приймальний лоток; 7 – пневмо-циліндр;
8 – зрівноважувальний клапан; 9 – вібратор; 10 - 13, 21 – ущільнення; 11, 20 – повітряно-відвідний та повітряно-підвідний патрубки; 12, 22 – транспортний трубопровід; 14 – пружні діафрагми;
15 – основа; 16 – вібралоток;
17 – герметична порожнина

Джерело: розроблено авторами на підставі [4, 12-14]

Розглядається рух одиначної частинки масою m , діаметром $d = 2 \cdot a$ з потоку стисненого повітря щільністю ρ_1 (рисунок 2). Частинка падає в трубопровід по низхідній траєкторії із завантажувального вікна до зустрічі з горизонтальною поверхнею вібруючого органу. Потім відбувається співудар частинки та робочої поверхні так, що частинка, отримавши додатковий імпульс як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямку, продовжує політ або до зустрічі з верхньою внутрішньою поверхнею трубопроводу, або знов з поверхнею робочого органу, або з нижньою поверхнею транспортного трубопроводу в залежності від протяжності робочого органу

вздовж трубопроводу. Далі розглядається режим з підкиданням в межах робочого органу, які характерні для вібраційно-пневмотранспортних машин з невеликою протяжністю робочого органу при $\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g} \gg 2$. На частинку діє в горизонтальному напрямку струмінь стисненого повітря з силою [2,7].

$$F_{\mu} = \frac{C_{\mu} \cdot \rho_1 \cdot (V_{1x} - \dot{x})^2 \cdot S_M}{2}$$

де C_u – коефіцієнт динамічного опору;

$$S_M = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ - площа поперечного перерізу частинки;}$$

 $\dot{x}$ - миттєва швидкість частинки по осі X;

V_{1x} - швидкість повітряного потоку.

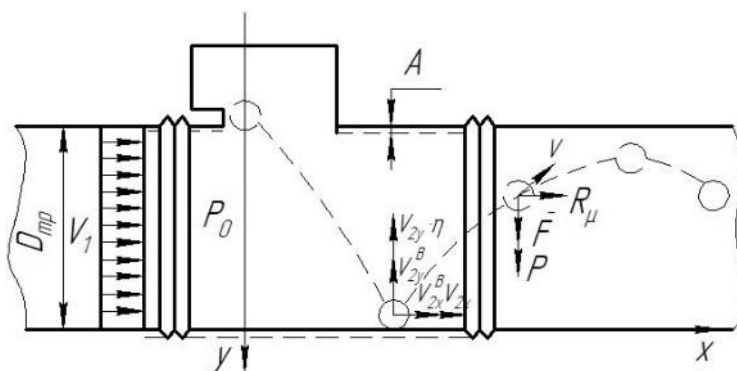


Рисунок 2 - Розрахункова схема дії сил на одиничну частинку матеріалу на вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії

Джерело: розроблене авторами

Вздовж вертикальної осі на частинку діє сила ваги та опору повітря. У зв'язку з тим, що по осі ОУ відносна швидкість частки та повітря мала, сила опору повітря визначається по закону Стокса [1-3]:

$$R = 3\pi \cdot \mu \cdot d \cdot \dot{\gamma}$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря.

Диференційні рівняння, що описують рух одиначної частинки на вібраційно-розгінній ділянці, записуються у вигляді [3, 5]:

$$m\ddot{x} = \frac{C_\mu \cdot \rho_l \cdot (V_{1x} - \dot{x})^2 S_M}{2} \quad (1)$$

Система (1) складається з двох незалежних диференціальних рівнянь, тому рішення їх проводиться по чергово.

Позначимо $\dot{x} = z$, $N = \frac{C_\mu \cdot \rho_l \cdot S_M}{2m}$, тоді перше рівняння системи (1) прийме вигляд:

$$\frac{dz}{dt} = N \cdot (V_1 - z)^2$$

або

$$\frac{dz}{(V_1 - z)^2} = N \cdot dt \quad (2)$$

Інтегруючи (2), отримаємо:

$$z = V_1 - \frac{1}{N \cdot t + C_1} \quad (3)$$

Постійна інтегрування C_1 визначається з початкових умов: $t = 0$, $x = V_{2x,0} + V_{2x}$, де $V_{2x,0}$ - горизонтальна складова початкової швидкості руху частинки на розгінній ділянці, рівна горизонтальній складовій кінцевої швидкості руху на завантажувальній ділянці ВПМ [3, 5], прийнято, що горизонтальна складова швидкості частинки при ударі об поверхню робочого органу не змінюється;

V_{2x} - горизонтальна складова швидкості руху частинки від вібраційного впливу [2], дорівнює:

$$V_{2x}^B = K_e \cdot A \cdot \varpi \cdot \cos \beta$$

де K_e - коефіцієнт, що визначається експериментально.

$$C_1 = \frac{1}{V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)}$$

Підставляючи C_1 , отримаємо вираз горизонтальної складової швидкості руху одиничної частки на вібраційно-розгінній ділянці:

$$V_{2x} = V_1 - \frac{1}{N \cdot t + \frac{1}{V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)}}$$

Інтегруючи вираз (3), отримаємо:

$$x = V_1 \cdot t - \frac{1}{N} \ln(N \cdot t + C_1) + C_2 \quad (4)$$

Враховуючи початкові умови $t = 0$, $x = 0$ визначаємо C_2 :

$$C_2 = \frac{1}{N} \ln C_1 - \frac{1}{N} \ln \frac{1}{V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)}$$

Підставляючи C_2 у вираз (4) та провівши деякі перетворення, отримаємо вираз горизонтальної проекції шляху частки на вібраційно-розгінній ділянці:

$$x = v_1 \cdot t - \frac{1}{N} \ln(N \cdot t [V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)] + 1) \quad (5)$$

Визначимо $3\pi \cdot \mu \cdot d = \alpha$, $\frac{\alpha}{m} = K$, тоді друге рівняння (1) записується у вигляді:

$$\ddot{y} = g - K \cdot \dot{y} \quad (6)$$

Вводимо змінну $l = g - K \cdot \dot{y}$, з урахуванням якої рівняння (6) отримає вигляд:

$$\frac{dl}{l} = -K dt$$

Інтегруючи це рівняння отримаємо:

$$\ln(g - K \cdot V_{2y}) = -K \cdot t + C_1 \quad (7)$$

де

$$V_{2y} = \dot{y}$$

На основі фізичних уявлень процесу, що розглядається, приймаються нульові початкові умови: $t = 0$

$$V_{2y,0} = -(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B) \quad (8)$$

де $V_{2y,0}$ – вертикальна складова кінцевої швидкості руху частинки на завантажувальній ділянці, визначається з розгляду механіки руху одиничної частинки при завантаженні транспортного трубопроводу [1, 7];

η – коефіцієнт відновлення при ударі частинки об поверхню робочого органу [1, 7, 9];

V_{2y}^B – вертикальна складова швидкості руху частинки від вібраційного впливу [1, 7, 9]:

$$V_{2y}^B = K_e \cdot A \cdot \varpi \cdot \sin \beta$$

З початкових умов (8) визначаємо:

$$C_1 = \ln[g + K \cdot (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)] \quad (9)$$

Підставляючи у (7) значення C_1 та потенціюючи його, після перетворень отримаємо вираз вертикальної складової швидкості руху одиничної частинки на вібраційно-розгінній ділянці від поверхні вантажонесучого вібраційного органу до верхньої точки траєкторії польоту частинки ($y_{\max}$):

$$V_{2y}^I = -\frac{1}{K} \left[e^{-Kt} [g + K(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)] - g \right] \quad (10)$$

Час руху частинки від поверхні робочого органу до верхньої точки траєкторії польоту визначаємо з рівняння (7) з урахуванням (9):

$$t_I = \frac{1}{K} \ln \frac{g + K(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)}{g - K \cdot V_{2y,0}} \quad (11)$$

Інтегруючи рівняння (10) знаходимо закон руху частинки у вертикальному напрямку:

$$y_I = \frac{e^{-Kt}}{K^2} [g + K(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)] + \frac{g \cdot t}{K} + C_2$$

Враховуючи початкові умови: $t = 0$, $y = 0$, визначаємо C_2 :

$$C_2 = -\frac{g + K(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)}{K^2}$$

Для рішення трансцендентного відносно t рівняння, використовуємо розкладання e^{Kt} у вигляді ряду:

$$e^{-Kt} = 1 - Kt + \frac{(Kt)^2}{2!} - \frac{(Kt)^3}{3!} + \dots$$

Для малих значень K приймаємо:

$$e^{-Kt} = 1 - Kt + \frac{(Kt)^2}{2!} \quad (12)$$

Підставляючи вираз (12) в рівняння для y_I та враховуючи значення C_2 , визначаємо:

$$y_I = \frac{g \cdot t_I^2}{2} - (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B) \left(t_I - \frac{K}{2} t_I^2 \right) \quad (13)$$

Тиск одиничної частинки від $y_{\max}$ до поверхні робочого органу або нижньої поверхні трубопроводу, аналогічно руху її на завантажувальній ділянці, де вертикальна складова швидкості частинки визначається відповідно виразу [2, 5, 7]

$$V_{2y}^H = \frac{g}{K} \cdot (1 - e^{-Kt})$$

Час польоту частинки від $y_{\max}$ до поверхні робочого органу або нижньої поверхні транспортного трубопроводу визначається аналогічно завантажувальній ділянці:

$$t = \sqrt{\frac{2[y_{\max}]}{g}} \quad (14)$$

Повний час руху частинки визначається за допомогою виразів (11) та (14):

$$t = t_I + t_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{g + K \cdot (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)}{g - K \cdot V_{2y,0}} + \sqrt{\frac{2[y_{\max}]}{g}}$$

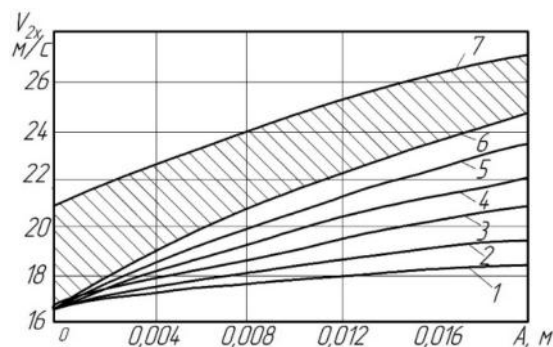
Величина горизонтальної проекції шляху частинки у вібраційно-розгінній ділянці до падіння її на нижню внутрішню поверхню трубопроводу або робочого органу встановлюється шляхом підстановки знайденого значення t в рівняння (5).

Числові розрахунки на основі формул (4), (5), (10), (13), та (15) для вібраційно-пневмотранспортних машин циклічної дії виконувались при наступних значеннях робочих параметрів:

$$\begin{aligned} V_1 &= 30 \div 50 \text{ м/с}; m = 0,00103 \text{ кг}; \\ C_\mu &= 0,1; P_0 = 0,5 \div 0,8 \cdot 10^6 \text{ Па}; \\ \rho_2 &= 2000 \text{ кг/м}^3; \rho_1 = 6 \div 9,6 \text{ кг/м}^3; \\ V_{2y,0} &= 1,86 \text{ м/с}; V_{2x,0} = 13,2 \text{ м/с}; \\ \mu &= 0,000018 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2; \\ A &= 0,002 \div 0,02 \text{ м}; \varpi = 20 \div 120 \text{ с}^{-1}; \\ d &= 0,01 \text{ м}; \eta = 0,2 \div 0,5. \end{aligned}$$

Сукупність наведених вище залежностей дозволяє встановити траєкторію та час руху куска сипкого матеріалу на вібраційно-розгінній ділянці ВПМЦ. Отримані дані свідчать про те, що в робочому діапазоні параметрів таких, як амплітуда, частота та кут вібрації, дальність польоту частки змінюється від 2 до 8 м, горизонтальна швидкість від 16 до 30 м/с. На рис. 3 представлені графічні залежності горизонтальної складової швидкості руху частинки в функції частоти та амплітуди коливань робочого органу.

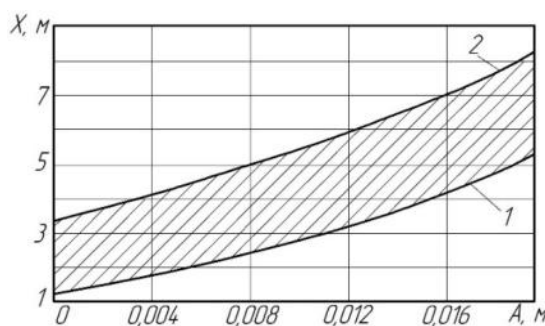
Виходячи з формули для V_{2x} виянилось, що максимальна горизонтальна швидкість польоту частинки при вібраційному впливі збільшується у 1,5–1,6 рази в порівнянні з горизонтальною швидкістю без вібраційного впливу. На рис. 4 та рис. 5 представлені залежності горизонтального та вертикального шляху частинки. Дальність польоту частинки при вібропневмотранспортуванні на розгінній ділянці збільшується від 3 до 5 разів. На рис. 5 представлені траєкторії польоту частинки в транспортному трубопроводі на вібраційно-розгінній ділянці. Вони дозволяють оцінити характер руху кускового матеріалу в залежності від параметрів, які варіюються.



- 1 – $\varpi = 20 \text{ c}^{-1}$; $\eta = 0,2$; 2 – $\varpi = 40 \text{ c}^{-1}$; $\eta = 0,2$;
 3 – $\varpi = 60 \text{ c}^{-1}$; $\eta = 0,2$; 4 – $\varpi = 80 \text{ c}^{-1}$; $\eta = 0,2$;
 5 – $\varpi = 100 \text{ c}^{-1}$; $\eta = 0,2$; 6 – $\varpi = 120 \text{ c}^{-1}$; $\eta = 0,2$;

Рисунок 3 - Залежність горизонтальної складової швидкості руху частинки від частоти та амплітуди коливань робочого органу

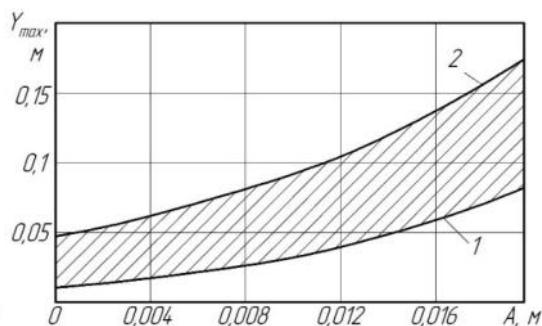
Джерело: розроблене авторами



- 1 – $\eta = 0,2$; 2 – $\eta = 0,5$

Рисунок 4 - Залежність дальності польоту частинки від амплітуди коливань робочого органу

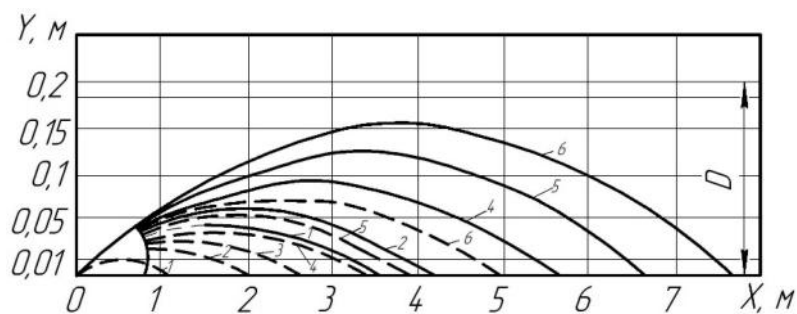
Джерело: розроблене авторами



- 1 – $\eta = 0,2$; 2 – $\eta = 0,5$; $\varpi = 20 \text{ c}^{-1}$;

Рисунок 5 - Залежність максимальної висоти польоту частинки від амплітуди коливань робочого органу

Джерело: розроблене авторами



- 1 – $A = 0$; 2 – $A = 0,004 \text{ м}$; 3 – $A = 0,008 \text{ м}$; $\varpi = 20 \text{ c}^{-1}$;
 4 – $A = 0,012 \text{ м}$; 5 – $A = 0,016 \text{ м}$; 6 – $A = 0,02 \text{ м}$.
 ----- $\eta = 0,2$; ————— $\eta = 0,5$

Рисунок 6 - Траєкторія польоту частинки сипкого кускового матеріалу на вібраційно-розгінній ділянці транспортного трубопроводу

Джерело: розроблене авторами

Висновки. Аналіз наведених вище досліджень механіки руху кускових сипучих матеріалів на завантажувальній вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії показує, що:

- 1 - довжина розгінної ділянки зменшується в 3-4 рази і становить 8-10 м;
- 2 - в кінці вібраційно-розгінної ділянки матеріал приймає швидкість 25-30 м/с.;
- 3 - для отримання таких швидкостей в пневмо-транспортних машинах без вібраційного впливу потрібна довжина розгінної ділянки близько 30-40 м.;
- 4 - використання вібраційного впливу на кусковий сипучий матеріал дозволяє наблизити розміщення викривлених елементів транспортного трубопроводу і тим самим розширити можливості компоновочних рішень технологічних схем пневмотранспорту сипучих матеріалів.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку передбачають створення нової конструкції машини задля зменшення енерговитрат на транспортування матеріалу.

Список літератури

1. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Investigation and Design Considerations for Vibrating Pneumatic Units in the Bulk Material Transport Systems / Bulk materials: keeping, loading and unloading operation and transportation. – Pap. 3 rd Int. Conf. Newcastle, Australia, 27 - 29 June 2000.
2. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Vibratory pneumatic machines for transportation of bulk materials / Pap. 4 th Int. Conf. of Pneumatic Conveying. Budapest, Hungary, 2002.
3. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Periodical regimes of solid particles motion in the gas flow horizontal channel / Pap. The 18 Int. Congr. Theor. and Appl. Mech. (UTAM). Haifa, Israel, 2001.
4. Потураєв В.Н. Волошин О.І., Яцун В.В. Деякі аспекти створення нового класу вібраційно-пневматичних машин для транспортування сипких матеріалів. *Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 1998. Вип. 4. С. 45-52.
5. Яцун В.В., Попов Г.А. Вплив швидкості повітряного потоку на процес пневмотранспортування сипких кускових матеріалів у вібропневмотранспортних системах. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2005. Вип. 16. С. 257-262.
6. Яцун В.В., Скринник І.О., Горпинченко О.В. Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу на розгінній ділянці пневмотранспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини. *Збірник наукових праць Центральноукраїнського національного технічного університету. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41) I. С. 101-110
7. Пономарьов Б. В. Развитие теории вибропневмо-транспортирования закладальных материалов: дис. д-ра техн. наук: 05.15.11 / НАН Украины; Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова. Д., 2006.
8. Гуцин В.М. Новая концепция та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів / В.М. Гуцин // *Машинознавство*, 2000, №2 (23). С. 39-43.
9. Bredenbruch E. Entstehung und Verhütung von Gruben branden // *Glückauf*. 2004.Н. 15/16.- S.393-404 p.
10. Tsuji Y., Morikawa Y., Tanaka L. Numerical simulation of gas-solid twophase flow in a two-dimensional horizontal channel // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2017. – 13, № 5. – P. 671-684.
11. Волошин О.І., Яцун В.В. Деякі питання створення закладальних вібраційно-пневматичних машин циклічної дії. *Збірник наукових праць НГА, вип. 2 (34). Сучасні шляхи розвитку гірничого обладнання*. Дніпропетровськ: НГА, 2007. С. 67-73.
12. А. с. 1331174 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Вібраційно-пневматична закладальна машина / Г.Ю.Надольний, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 3985706 заяв. 27.11.85 : опуб. 15.04.87, Бюл. 10.
13. А. с. 1643739 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Пневматична камерна закладальна машина / В.Н. Потураєв, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 4677481 заяв. 11.04.89 : опуб. 22.12.90, Бюл. 15.
14. А. с. 1654605 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Камерна закладальна машина / І.Ф.Чемерис, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 4702679: заяв. 09.06.89 : опуб. 07.06.91, Бюл. 21.

References

1. Poturayev, V. N., Voloshin, A. I., & Ponomaryov, B. V. (2000). Investigation and design considerations for vibrating pneumatic units in the bulk material transport systems. In *Bulk materials: Keeping, loading and unloading operation and transportation* (Paper presented at the 3rd International Conference, Newcastle, Australia, June 27–29).
2. Poturayev, V. N., Voloshin, A. I., & Ponomaryov, B. V. (2002). Vibratory pneumatic machines for transportation of bulk materials. In *Proceedings of the 4th International Conference of Pneumatic Conveying*, Budapest, Hungary.

3. Poturayev, V. N., Voloshin, A. I., & Ponomaryov, B. V. (2001). Periodical regimes of solid particles motion in the gas flow horizontal channel. In *Proceedings of the 18th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, Haifa, Israel.
4. Poturaiev, V. N., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1998). *Some aspects of creating a new class of vibratory-pneumatic machines for bulk material transportation. Collection of Scientific Works of Kirovohrad Institute of Agricultural Engineering. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (4), 45–52 [in Ukrainian].
5. Yatsun, V. V., & Popov, H. A. (2005). *Influence of air flow velocity on the process of pneumatic transportation of bulk lumpy materials in vibratory-pneumatic transport systems. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (16), 257–262 [in Ukrainian].
6. Yatsun, V. V., Skrynnik, I. O., & Horpynchenko, O. V. (2024). *Study of the mechanics of bulk lumpy material movement in the acceleration section of the pneumatic pipeline of a vibratory-pneumatic transport machine. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41/I), 101–110 [in Ukrainian].
7. Ponomarov, B. V. (2006). *Development of the theory of vibratory-pneumatic transportation of backfilling materials* (Doctoral dissertation). Dnipro: Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov, NAS of Ukraine [in Ukrainian].
8. Hushchyn, V. M. (2000). *New concept and its implementation in the development of highly efficient means of pneumatic transportation of bulk materials. Mashynoznavstvo*, 2(23), 39–43 [in Ukrainian].
9. Bredenbruch, E. (2004). Entstehung und Verhütung von Grubenbränden. *Glückauf*, 15/16, 393–404.
10. Tsuji, Y., Morikawa, Y., & Tanaka, L. (2017). Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a two-dimensional horizontal channel. *International Journal of Multiphase Flow*, 13(5), 671–684.
11. Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (2007). *Some issues of creating cyclic vibratory-pneumatic backfilling machines. Collection of Scientific Works of the National Mining Academy. Modern Ways of Mining Equipment Development*, 2(34), 67–73 [in Ukrainian].
12. Nadolnyi, H. Yu., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1987). *Vibratory-pneumatic backfilling machine. Author's certificate 1331174 USSR, IPC E21F 15/10, No. 3985706; filed 27.11.1985; published 15.04.1987, Bulletin No. 10* [in Russian].
13. Poturayev, V. N., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1990). *Pneumatic chamber backfilling machine. Author's certificate 1643739 USSR, IPC E21F 15/10, No. 4677481; filed 11.04.1989; published 22.12.1990, Bulletin No. 15* [in Russian].
14. Chemeris, I. F., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1991). *Chamber backfilling machine. Author's certificate 1654605 USSR, IPC E21F 15/10, No. 4702679; filed 09.06.1989; published 07.06.1991, Bulletin No. 21* [in Russian].

Volodymyr Yatsun, Prof., PhD tech. sci., **Ivan Skrynnik**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Gennadiy Portnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Horpyuchenko Olha**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of the Mechanics of the Movement of Loose Lumpy Material in the Loading Zone on the Vibration-Acceleration Section of the Vibration Pneumatic Transport Machine of Cyclic Action

The purpose of this work is the task of researching the vibration effect on the pneumatic transportation of bulk lumpy material in the loading zone on the vibration-acceleration section of the cyclic-action vibration-pneumatic conveying machine. Acceleration section of pneumo-transportation of bulk lumpy material is the minimum length of the transport pipeline, on which the movement of the material takes a steady state. The vibration-acceleration section, in vibro-pneumotransport devices, takes into account the effect of vibration on the material in the loading zone. The analysis of the processes occurring during loading in the vibration-acceleration section of the VPMC will allow to identify optimal technical solutions for further improvement of the machine design.

The analysis of the above studies of the mechanics of the movement of lumpy bulk materials in the loading vibration-acceleration section of the vibration-pneumotransport machine of cyclic action shows that the length of the acceleration section is reduced by 3-4 times and is 8-10 m. At the end of the vibration-acceleration section, the material reaches a speed of 25-30 m/s. In order to obtain such speeds in pneumo-transport machines without the influence of vibration, the length of the acceleration section is about 30-40 m. The use of the vibration effect on lumpy bulk material allows you to approximate the location of curved elements of the transport pipeline and thereby expand the possibilities of layout solutions for technological schemes of pneumatic transport of bulk materials.

Prospects for further research in this direction include the creation of a new machine design to reduce energy consumption for material transportation.

vibration-accelerating section, loading section, transport pipeline, aeromix

Одержано (Received) 03.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.06.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

УДК 621.316

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.308-315](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.308-315)

П. Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, В. П. Солдатенко, доц., канд. техн. наук,
В. В. Зінзура, доц., канд. техн. наук, О. І. Сіріков, доц., канд. техн. наук,
С. П. Плешков, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vasilizinzura@gmail.com

Оптимальне керування рівнем генерації активної потужності установками з відновлюваними джерелами енергії

Метою даного дослідження є забезпечення найвищого можливого обсягу виробництва активної потужності від відновлюваних джерел енергії при одночасному забезпеченні нормативно встановлених значень відхилення напруги у місці підключення електричних споживачів до розподільчої електромережі. Показано, що задачу автоматичного керування установками з відновлюваними джерелами доцільно формалізувати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано розрахункову процедуру для знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель системи автоматичного керування параметрами режиму електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії, що базується на знайдених в роботі розв'язках задачі багатокритеріальної оптимізації. Результати проведеного комп'ютерного імітаційного моделювання, отримані з допомогою зазначеної моделі, підтвердили значно більшу ефективність розробленої системи автоматичного керування в порівнянні з існуючими.

відновлювані джерела електроенергії, багатокритеріальна оптимізація, розподільна електрична мережа

Постановка проблеми. Теперішній період розвитку як світової так і вітчизняної енергетичної галузі характеризується неупинним зростанням рівня впровадження систем виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Під час використання систем з альтернативними джерелами енергії на виробничих об'єктах місце їх підключення до розподільчої електромережі зазвичай збігається з точкою приєднання електричних споживачів. Відомо, що в процесі виробництва електроенергії відбувається зростання напруги в місці з'єднання генеруючої установки з мережею. Відтак в режимі зворотного руху потужності в розподільчих електромережах можуть виникати надмірно високі значення відхилення напруги.

Проведений аналіз відомих систем автоматичного керування (САК) генеруючих установок на базі ВДЕ показав, що усі вони втілюють концепцію автоматичного регулювання, при якій відбувається обмеження обсягу виробництва активної потужності у мережу в разі появи понаднормового перевищення значення напруги.

Недоліком такого підходу є скорочення економічних надходжень від реалізації електроенергії у мережу за «зеленим» тарифом, що обумовлено зменшенням обсягу генерації активної потужності у мережу.

Зважаючи на це завдання покращення САК генеруючими системами на основі ВДЕ з метою досягнення оптимального обсягу виробництва активної потужності цими системами при дотриманні нормативно встановлених меж усталеного відхилення напруги у місці підключення електроспоживачів до розподільчої електромережі є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] представлено результати дослідження впливу активної потужності, що генерується сонячними електростанціями, на рівень відхилення напруги на шинах споживачів у мережах 0,4 кВ. Показано, що в умовах функціонування локальних електричних мереж можуть виникати режими, за яких напруга на шинах 0,4 кВ виходить за межі нормативно допустимого діапазону. Зазначено також, що у таких системах спостерігаються різкі коливання напруги на шинах підстанцій споживачів, а величина усталеного відхилення напруги може перевищувати номінальне значення більш ніж на 10 %.

У роботі [2] зазначено, що в розподільчих електричних мережах, де активно впроваджуються та експлуатуються установки на основі відновлюваних джерел енергії, спостерігається погіршення показників якості електроенергії. Зокрема, фіксуються понаднормові відхилення напруги на шинах трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ та спотворення синусоїдальної форми напруги.

В роботах [3, 4] зазначено, що інтеграція відновлюваних джерел у сучасні енергетичні системи спричиняє серйозні проблеми з коливанням частоти та напруги.

Для вирішення цієї проблеми автори роботи [3] пропонують застосувати оптимальний дворежимний ПІ-контролер з диференціальним керуванням, налаштований за синусоїдно-косинусним алгоритмом.

В роботі [4] для вирішення цієї проблеми автори пропонують використовувати оптимальне каскадне пропорційне інтегральне керування з двома ступенями свободи. Для забезпечення стабільної роботи цей контролер використовується для керування частотою навантаження та автоматичного регулювання напруги.

В роботі [5] пропонується застосування нечіткого ПД-регулятора для автоматичного керування параметрами режиму мережі з ВДЕ. Цей контролер регулює відхилення частоти енергосистеми та керує зміною навантаження мережі гібридної енергетичної системи, що складається з джерел енергії вітру, біомаси та фотоелектричних джерел.

Загальним недоліком підходів, описаних в роботах [3, 4, 5] є неврахування можливого зниження рівня генерації електроенергії від установок з ВДЕ за рахунок жорсткого обмеження верхньої межі усталеного відхилення напруги.

Постановка завдання. Метою дослідження є забезпечення найвищого можливого обсягу виробництва активної потужності від ВДЕ при одночасному забезпеченні нормативно встановлених значень відхилення напруги у місці підключення електричних споживачів до розподільчої електромережі.

Виклад основного матеріалу. Одним із шляхів підвищення рівня вироблення електроенергії з ВДЕ без значного впливу на якість електроенергії є удосконалення їх систем автоматичного керування.

На рис. 1 зображена типова схема електричної мережі промислового підприємства до якої приєднані установки з ВДЕ.

Досягнення максимальної ефективності використання потужності установок з ВДЕ при одночасній мінімізації рівня відхилення напруги на шинах споживачів можливе лише за умова застосування індивідуальних САК рівнем потужності кожної з установок.

Зважаючи на це, процес автоматичного керування установками з ВДЕ доцільно формалізувати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації [6, 7]:

$$\begin{cases} -PR(P_{\text{gen}}) \rightarrow \min; \\ LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{gen}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{cases} \quad (1)$$

де P_{gen} – величина потужності генерації від ВДЕ;
 $[P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}]$ – область допустимих значень P_{gen} ;
 $PR(P_{\text{gen}})$ – значення прибутку від продажу генерованої ВДЕ електроенергії;
 $LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}})$ – величина економічних збитків від понаднормових значень відхилення напруги у вузлах електромережі.

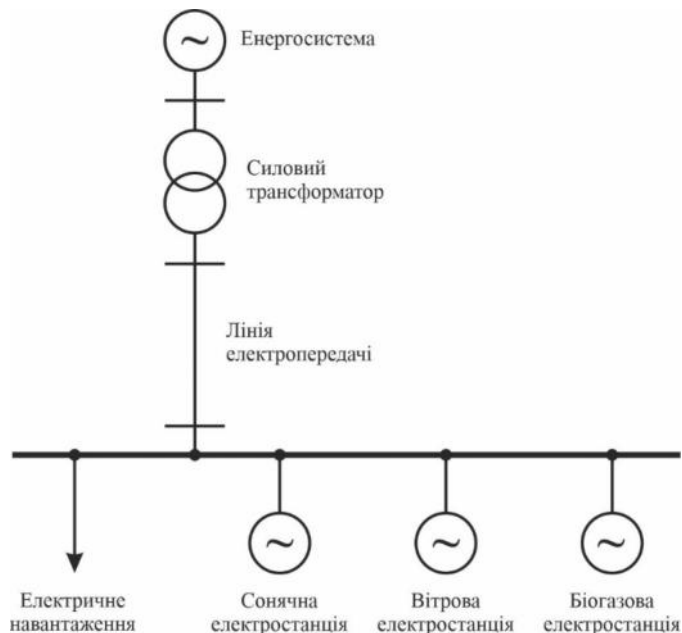


Рисунок 1 – Типова схема електричної мережі підприємства з установками ВДЕ.

Джерело: розроблено авторами

Як зазначено в роботі [8], для розв'язання задач подібних до (1) найбільш доцільно застосовувати метод наближення до утопічної точки. Даний метод реалізується в 2 кроки:

1. Визначаються мінімальні значення кожного з критеріїв задачі (1) (знаходяться координати утопічної точки $Q_{\text{ut}} = (PR_{\text{ut}}, LS_{\text{ut}})$ в просторі критеріїв).

2. В результаті вирішення задачі мінімізації відстані від утопічної точки до парето-оптимальної множини визначається кінцевий розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації в просторі керування (оптимальне значення потужності $P_{\text{gen}}^{\text{opt}}$)

Для варіанту чебишевської відстані вираз для знаходження кінцевого розв'язку задачі (1) має вигляд:

$$\begin{cases} \max \left\{ \frac{-PR(P_{\text{gen}}) - PR_{\text{ut}}}{\zeta_1}, \frac{LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}}) - LS_{\text{ut}}}{\zeta_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{gen}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{cases} \quad (2)$$

де ζ_1, ζ_2 – це вагові коефіцієнти кожного з критеріїв оптимізації.

Таким чином згідно описаного методу вирішення багатокритеріальної задачі (1) зводиться до знаходження розв'язків декількох задач скалярної оптимізації.

Відома досить велика кількість методів скалярної оптимізації. Їх умовно можна поділити на дві групи: аналітичні та чисельні методи.

Для знаходження розв'язків більшості практичних оптимізаційних задач застосовують чисельні методи [9, 10]. При чому вибір конкретного методу скалярної оптимізації обумовлюється специфікою оптимізаційної задачі.

Сучасні САК рівнем генерації потужності установок ВДЕ можуть забезпечити точність регулювання на рівні 1 %. Зважаючи на це, а також на невелику розмірність задачі (1), її розв'язок найбільш доцільно шукати в дискретному вигляді.

За такого підходу алгоритм знаходження розв'язку задачі (1) полягає в наступному:

1. Здійснюється дискретизація області допустимих значень потужності в межах інтервалу $[P_{\min} \dots P_{\max}]$ із заданим кроком dP_{gen} .

2. Для кожного дискретного значення $P_{\text{gen}i}$ виконується розрахунок відповідних значень критеріїв $-PR, LS_{\Delta U}$. В результаті цих розрахунків отримується множина D :

$$D = \left\{ d_1 \left[-PR(P_{\text{gen}1}), LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}1}) \right], \dots, d_i \left[-PR(P_{\text{gen}i}), LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}i}) \right] \right\} \quad (3)$$

Для випадку задачі (1) зважаючи на її розмірність елементи множини D будуть належати парето-оптимальній множині розв'язків цієї задачі.

3. Визначаються координати утопічної точки $Q_{\text{ut}} = (PR_{\text{ut}}, LS_{\text{ut}})$ як найменше та найбільше значення елементів дискретної множини D . Для цього можливо використати метод повного перебору або інший метод дискретної оптимізації.

4. Для кожного d_i елементу множини D знаходяться значення евклідової відстані l_i від цього елементу до променя m (рис. 2) згідно виразу:

$$l_i = \left(\left(\frac{-PR_i + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_{\Delta U i} - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_u}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} - (-PR_i) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \frac{-PR_i + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_{\Delta U i} - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} LS_u}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} + LS_u - LS_{\Delta U i}}{\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 + 1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

В результаті розрахунків отримується скінченна множина відстаней $L = \{l_1 \dots l_i\}$

5. Одним із методів дискретної оптимізації (наприклад, методом повного перебору) знаходиться найменший елемент $l_{\min}$ множини L . Розв'язком задачі (1) буде значення $P_{\text{gen}}^{\text{opt}}$ елементу множини D $d^{\text{opt}} \left[-PR(P_{\text{gen}}^{\text{opt}}), LS_{\Delta U}(P_{\text{gen}}^{\text{opt}}) \right]$, який відповідає елементу $l_{\min}$ множини L .

Геометрична інтерпретація алгоритму визначення розв'язку задачі (1) показана на рис. 2.

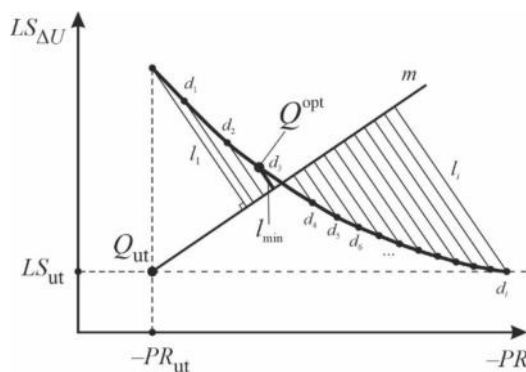


Рисунок 2 – Геометрична інтерпретація знаходження розв’язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1)

Джерело: розроблено авторами

Для перевірки працездатності запропонованого підходу та визначення ефекту від застосування розв'язків задачі (1) згідно розробленого алгоритму було використано метод комп'ютерного імітаційного моделювання.

Комп'ютерна імітаційна модель САК рівнем генерації потужності установками з ВДЕ, в основу якої покладено запропонований алгоритм вирішення задачі (1), наведена на рис. 3.

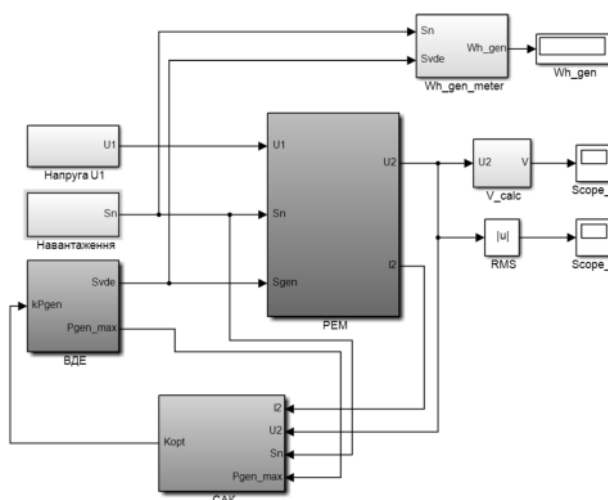


Рисунок 3 – Комп'ютерна модель САК рівнем генерації потужності установками з ВДЕ

Джерело: розроблено авторами

У якості еталонної моделі для порівняльного аналізу було обрано систему автоматичного керування, що здійснює керування рівнем генерації активної потужності ВДЕ таким чином, щоб відхилення напруги на шинах споживача не перевищувало рівня у 5%.

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 4 – 7: 1 – автоматичне керування відсутнє, 2 – еталонна САК, 3 – розроблена САК.

Як демонструють графіки, представлені на рисунках 4–5, запропонована модель системи автоматичного керування забезпечує підвищення рівня генерації активної потужності установками з відновлюваних джерел енергії в електричну мережу.

У випадку відсутності керування генерацією активної потужності з боку установок ВДЕ спостерігається максимальний добовий обсяг виробленої електроенергії – 219 кВт·год. Водночас напруга на шинах споживача виходить за межі нормативно допустимого діапазону $\pm 5\%$ з інтегральною ймовірністю 89 %, що є порушенням нормативних вимог до якості електроенергії.

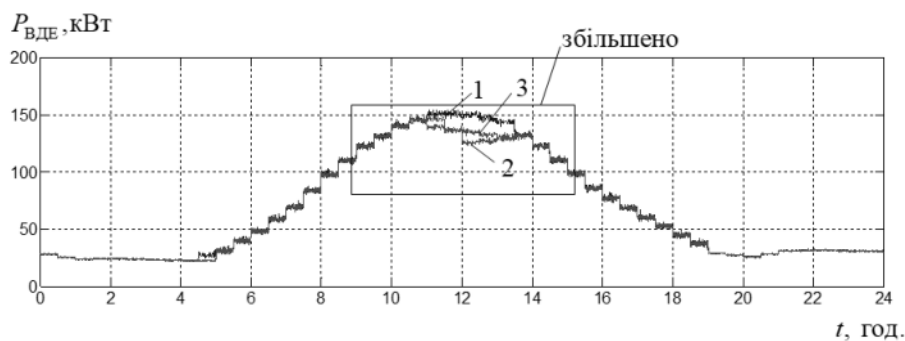


Рисунок 4 – Графіки зміни генерації активної потужності установками з відновлюваних джерел енергії
Джерело: розроблено авторами

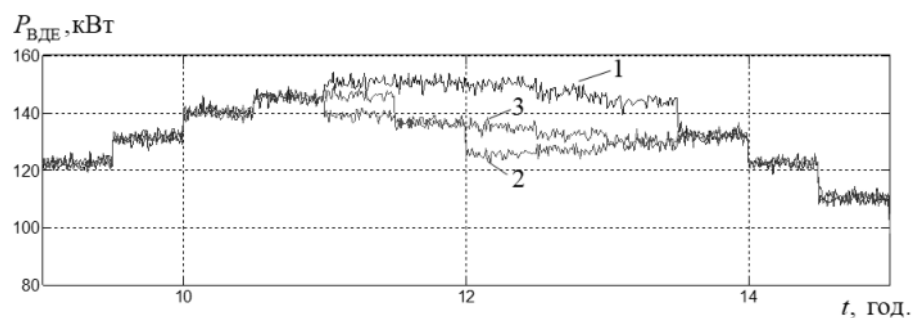


Рисунок 5 – Графіки зміни генерації активної потужності установками з відновлюваних джерел енергії
(збільшено)

Джерело: розроблено авторами

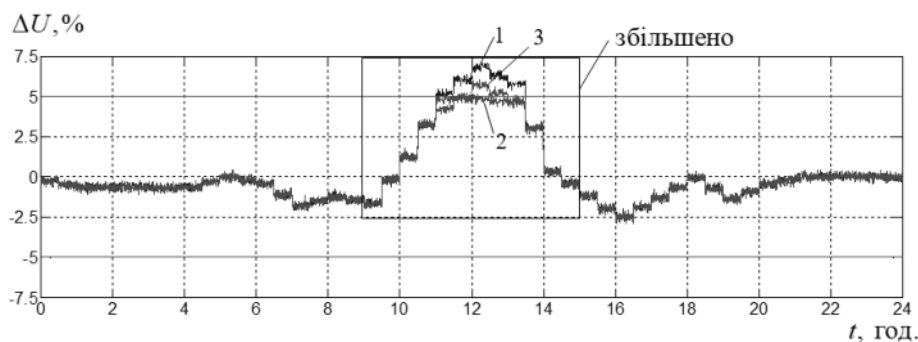


Рисунок 6 – Графіки зміни відхилення напруги в точці приєднання ВДЕ та навантаження
Джерело: розроблено авторами

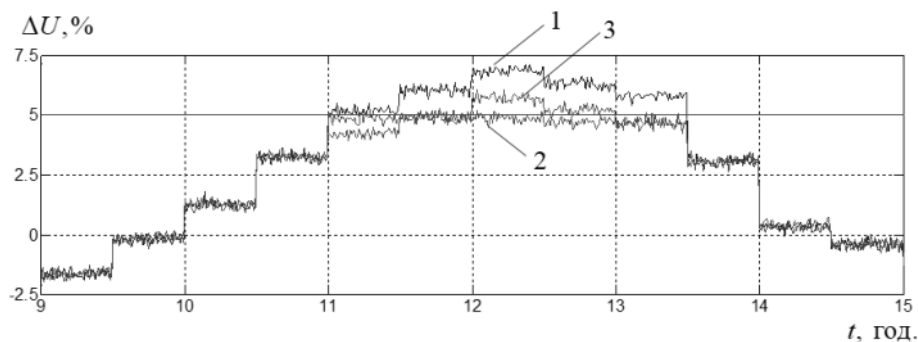


Рисунок 7 – Графіки зміни відхилення напруги в точці приєднання ВДЕ та навантаження (збільшено)
Джерело: розроблено авторами

У разі використання базової моделі керування генерацією активної потужності ВДЕ, яка передбачає обмеження відхилення напруги в межах нормативного діапазону $\pm 5\%$, забезпечується стовідсоткове потрапляння усталеного значення напруги в допустимі межі. Проте це супроводжується зниженням обсягу переданої до розподільчої електричної мережі електроенергії, що призводить до втрати 24% потенційного енергогенеруючого та економічного ефекту.

Використання розробленої оптимальної системи автоматичного керування генерацією активної потужності ВДЕ забезпечує збільшення обсягів постачання електроенергії в мережу на 8,1 % порівняно з базовою моделлю керування. При цьому інтегральна ймовірність потрапляння усталеного значення відхилення напруги в межі допустимого діапазону становить 95 %, що відповідає вимогам чинних нормативів щодо якості електроенергії.

Отже, реалізація запропонованого алгоритму оптимального керування генерацією активної потужності відновлюваними джерелами енергії в умовах, розглянутих у дослідженні, забезпечує зростання обсягу подачі електроенергії в мережу на 8,1 %, при цьому гарантуючи відповідність усталеного відхилення напруги встановленим нормативним вимогам.

Висновки. В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз засвідчив, що для розв'язання задачі автоматизованого керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії доцільно застосовувати підхід, заснований на наближенні до утопічної точки в просторі критеріїв. При цьому оптимальне рішення досягається шляхом мінімізації чебишевської відстані між утопічною точкою та парето-оптимальною множиною розв'язків.

2. З урахуванням дискретної природи регулювання активної потужності генерації, доцільним підходом до розв'язання задачі автоматичного керування є використання запропонованої в роботі розрахункової процедури, заснованої на методі повного перебору.

3. Результати комп'ютерного моделювання функціонування розробленої системи автоматичного керування, побудованої на основі розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації, засвідчили її перевагу порівняно з еталонною САК. Зокрема, обсяг генерації активної потужності у випадку застосування запропонованої в роботі САК виявився на 8,1 % вищим. При цьому рівень усталеного відхилення напруги відповідає вимогам нормативних документів щодо якості електроенергії.

Список літератури

1. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія : наук. журн.* 2015. № 3 (41). С. 7–13.
2. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2015. № 2. С. 134–145.
3. Irfan R., Gulzar M. M., Shakoор A., Habib S., Ahmad H., Hasib S. A., Tehreem H. Robust operating strategy for voltage and frequency control in a non-linear hybrid renewable energy-based power system using communication time delay. *Computers and Electrical Engineering.* 2025. Vol. 123. P. 110119.
4. Irfan R., Gulzar M. M., Habib S., Shakoор A., Ahmad H., Murtaza A. F. Multistage control for frequency and voltage stability in a multi-area power network with nonlinear dynamics. *Results in Engineering.* 2025. Vol. 26. P. 104724.
5. Ali G., Aly H., Little T. Automatic generation control of a multi-area hybrid renewable energy system using a proposed novel GA-fuzzy logic self-tuning PID controller. *Energies.* 2024. Vol. 17 (9). P. 2000.
6. Солдатенко В. П. Автоматичне керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації. *Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф.* (Кропивницький, 16–17 листоп. 2017 р.). Кропивницький : ЦНТУ, 2017. С. 88–90.
7. Плешков П. Г., Солдатенко В. П. Керування режимами роботи розподільної електричної мережі при наявності джерел розосередженої генерації. *Прикладні науково-технічні дослідження : матер. II міжнар. наук.-практ. конф.* (Івано-Франківськ, 3–5 квіт. 2018 р.). Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2018. С. 71.
8. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. *Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 350–360.

9. Martins J. R., Ning A. *Engineering design optimization*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021.
10. Gill P. E., Murray W., Wright M. H. *Numerical linear algebra and optimization*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021.

References

1. Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., & Hunko, I. O. (2015). *Influence of solar power plants on the voltage of 0.4 kV consumers*. *Energy: Economics, Technology, Ecology: Scientific Journal*, 3(41), 7–13 [in Ukrainian].
2. Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., & Hunko, I. O. (2015). *Influence of solar power plant inverters on power quality indicators in local electrical systems*. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, (2), 134–145 [in Ukrainian].
3. Irfan, R., Gulzar, M. M., Shakoor, A., Habib, S., Ahmad, H., Hasib, S. A., & Tehreem, H. (2025). Robust operating strategy for voltage and frequency control in a non-linear hybrid renewable energy-based power system using communication time delay. *Computers and Electrical Engineering*, 123, 110119.
4. Irfan, R., Gulzar, M. M., Habib, S., Shakoor, A., Ahmad, H., & Murtaza, A. F. (2025). Multistage control for frequency and voltage stability in a multi-area power network with nonlinear dynamics. *Results in Engineering*, 26, 104724.
5. Ali, G., Aly, H., & Little, T. (2024). Automatic generation control of a multi-area hybrid renewable energy system using a proposed novel GA-fuzzy logic self-tuning PID controller. *Energies*, 17(9), 2000.
6. Soldatenko, V. P. (2017). Automatic control of the operation modes of the distribution electrical network in the presence of distributed generation sources. In *Automation and Computer-Integrated Technologies in Industry, Telecommunications, Energy, and Transport: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Online Conference (Kropyvnytskyi, November 16–17, 2017)* (pp. 88–90). Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
7. Plieshkov, P. H., & Soldatenko, V. P. (2018). *Control of operating modes of the distribution electrical network in the presence of distributed generation sources*. In *Applied Scientific and Technical Research: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference (Ivano-Frankivsk, April 3–5, 2018)* (p. 71). Ivano-Frankivsk: Symfonia forte [in Ukrainian].
8. Zinzura, V. V. (2012). *Methods for solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electrical networks*. *Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, 25(1), 350–360 [in Ukrainian].
9. Martins, J. R., & Ning, A. (2021). *Engineering design optimization*. Cambridge: Cambridge University Press.
10. Gill, P. E., Murray, W., & Wright, M. H. (2021). *Numerical linear algebra and optimization*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.

Petro Plieshkov, Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Vasyl Zinzura, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Serhii Plieshkov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Optimal Control of Active Power Generation Levels by Renewable Energy Plants

The purpose of this article is to develop an effective approach to automated control of the level of active power generation in systems based on renewable energy sources in order to ensure maximum electricity generation while complying with the regulatory permissible voltage deviation limits at the points of connection of electricity consumers to the distribution grid.

The article analyzes the problems that arise when generating electricity from renewable sources in the conditions of distribution grids - in particular, exceeding the permissible voltage level at the points of connection and reducing the economic efficiency of generation when using typical automatic control systems. It is proposed to improve the system for automatic control of the level of active power generation by installations with renewable energy sources by formalizing the control process as a multi-criteria optimization problem. The main criteria are profit from the sale of electricity and economic losses from voltage quality disturbances.

The problem is solved by the method of approximation to the utopian point using the Chebyshev metric and numerical methods of discrete optimization. For this purpose, a step-by-step algorithm was developed, which involves discretization of the area of permissible generation values, calculation of the Pareto-optimal set, determination of the utopian point and minimization of the distance to it. In order to assess the effectiveness of the proposed approach, a computer model of the automatic control system was built, which is based on the specified algorithm. The model was tested in a simulation environment, where it was compared with a traditional control system that provides a strict limitation of the voltage deviation. The simulation results showed that the proposed approach provides an increase in the volume of electricity supply to the network by 8.1% compared to the base model. At the same time, the level of the steady-state voltage deviation at the connection point meets the regulatory requirements for the quality of electricity (integral probability - 95%). Thus, the improved automatic control system allows achieving both technical and economic optimality of the functioning of renewable energy sources in the power system

renewable energy sources, multi-criteria optimization, distribution grid

Одержано (Received) 26.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.06.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.536.55

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.316-325](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.316-325)**О. О. Бойко**, доц, канд. техн. наук, **Є. К. Воскобойник**,**Є. В. Кошеленко**, доц, канд. техн. наук,*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна**e-mail: voskoboinyk.ye.k@ntu.one*

Дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку з використанням децентралізованої системи в умовах обмеженого електропостачання

Виконано удосконалення моделі теплового обміну у будинку, та запропоновано ефективний спосіб досягнення бажаних показників мікроклімату у відповідній зоні за мінімізації витрат енергоресурсів. Підтримка мінімально допустимої температури у будинку за рахунок системи водяного опалення та використання окремого джерела тепла з широким діапазоном керування для підтримки у ній теплового комфорту. Запропоновано методи зменшення використання енергоресурсів.

тепловий комфорт, мікроклімат, прогнозована середня оцінка PMV, децентралізована система керування, інтернет речей, двопозиційний регулятор

Постановка проблеми. Опалення приміщень є найбільшим кінцевим споживачем енергоресурсів у світі. За даними Міжнародного енергетичного агентства 2021 року на нього припадає 66 %, 37 % та 54 % в Європі, Сполучених Штатах Америки та Китайській Народній Республіці відповідно [1]. У Федеративній Республіці Німеччина на 2020 рік розподіл енергоресурсів на опалення мав вигляд [2]: природний газ 49,5 %, мазут 25 %, центральне опалення 14,1 %, електроенергія 2,6 %, теплові насоси 2,6 %, інші джерела 6,2 %. Перепис 2022 року підтвердив, що три чверті всіх помешкань у Німеччині опалюються газом або мазутом [3], що також відповідає загальним тенденціям присутнім в Європейському Союзі [4]. Досліди світового ринку опалювального обладнання показують, що такий стан речей буде зберігатися як найменше до 2030 року [5], при цьому з урахуванням продажів електричних, пелетних і біопаливних котлів, сонячних колекторів та теплових насосів найбільш поширеними протягом наступного десятиліття будуть заставатися водяні системи.

Суттєве зменшення витрат приватного домогосподарства може бути досягнуто за рахунок економії енергоресурсів при його опаленні, а найбільш перспективним напрямком у цьому є удосконалення водяних систем. Керування у таких системах відбувається автоматикою котла або зовнішньою автоматикою.

У першому випадку зворотній зв'язок реалізується за температурою теплоносія – води. Недоліком таких систем є відсутність контролю температури у приміщеннях, що може призвести до замерзання системи опалення або зайвих витрат енергоресурсів.

У другому випадку встановлюється кімнатний термостат, регулятор або погодозалежний контролер. Кімнатний термостат забезпечує підтримку температури у заданій точці приміщення, що у загальному випадку зменшує енерговитрати. Недоліком цього рішення є відсутність регулювання потужності котла. Кімнатний регулятор виконує функції термостату однак на відміну від нього формує не дискретний, а безперервний

запит потужності котла. Таке рішення залежить від виробника, має більшу вартість та не має великого попиту серед користувачів. Погодозалежний контролер забезпечує реагування відповідно до зміни зовнішньої температури, що на значних перепадах зменшує енерговитрати та запобігає замерзанню системи опалення. Окрім того у залежності від реалізації такий контролер може виконувати функції як кімнатного термостата так і регулятора.

Безпосередня зміна теплового потоку у конкретному приміщенні багатокімнатного будинку зазвичай забезпечується термостатичними клапанами. В якості пристроїв керування яких використовуються термостатичні головки, приводи термоелектричні або сервоприводи. Головними недоліками такого рішення є низька точність $\pm 2^\circ\text{C}$, необхідність постійного регулювання та надійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання теплового комфорту людини є предметом численних наукових досліджень, у яких це явище розглядається як багатфакторна функція, що залежить як від зовнішніх фізичних умов, так і від фізіологічних характеристик організму. У науковій літературі запропоновано ряд моделей, які враховують реакцію людини на комплекс зовнішніх впливів, що формують суб'єктивне відчуття комфорту або дискомфорту в середовищі [6,7].

Однією з найпоширеніших і визнаних моделей є модель прогнозованої середньої оцінки – PMV (Predicted Mean Vote), яка використовується для кількісного оцінювання теплового стану людини в конкретних мікрокліматичних умовах. У межах цієї моделі тепловий комфорт визначається шістьма основними параметрами:

- температурою повітря,
- середньою радіаційною температурою,
- швидкістю руху повітря,
- відносною вологістю повітря,
- теплоізоляційними властивостями одягу,
- рівнем фізичної активності (метаболічною теплопродукцією).

Вказані чинники лягли в основу міжнародних і національних стандартів [8-10], що регламентують мікрокліматичні вимоги до житлових і робочих приміщень. Врахування цих змінних дозволяє забезпечити більш об'єктивну та адаптивну систему керування умовами теплового середовища.

Проте аналіз існуючих апаратних засобів контролю мікроклімату свідчить про те, що більшість із них орієнтовані лише на вимірювання температури повітря та відносної вологості. Як приклад, у роботі «Автоматизація процесів керування мікрокліматом житлових приміщень» З. Микитюк, О. Шимчишин, А. Зворський, Д. Марків [11] розглядається актуальне завдання підвищення ефективності та оптимізації процесів керування мікрокліматом у житлових приміщеннях. Основною метою дослідження є розроблення автоматизованої системи, що забезпечує точне налаштування та стабільний контроль основних параметрів мікроклімату. Реалізація такої системи сприятиме покращенню умов теплового комфорту для користувачів, а також підвищенню енергоефективності функціонування інженерних мереж житлових об'єктів. Але таке обмежене уявлення про стан мікроклімату є недостатнім для повноцінної оцінки теплового комфорту людини. Зокрема, параметри метаболізму та теплоізоляції одягу, які мають суттєвий вплив на теплове самопочуття, часто ігноруються. Подібний підхід може бути виправданий у випадках регулювання умов для неживих об'єктів, таких як продукти чи рослини, однак у контексті забезпечення комфортного середовища для людини є неприпустимим. Ігнорування цих чинників може призводити до зниження ефективності терморегуляції, погіршення самопочуття та зменшення продуктивності.

Постановка завдання. Метою роботи є синтез та дослідження автоматизованої системи керування тепловим комфортом у багатозонному житловому середовищі, яка дозволить забезпечити зниження енерговитрат на опалення при обмежених енергетичних ресурсів, за рахунок використання інноваційного підходу керування мікрокліматом на підставі прогнозованої середньої оцінки PMV та децентралізованого керування.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні одним із найпоширеніших рішень у сфері опалення багатокімнатних житлових будинків є використання систем з водою як теплоносієм. Однак такі системи мають суттєвий недолік – необхідність підтримки однакової температури у всіх приміщеннях, що унеможлиблює індивідуальне керування тепловим комфортом для кожної зони. Існуючі засоби автоматичного регулювання, такі як термостати, термостатичні клапани, погодозалежні контролери тощо, забезпечують лише часткову адаптацію до змін зовнішніх та внутрішніх умов і не гарантують високої точності підтримки індивідуального теплового комфорту.

В умовах зростання вимог до енергоефективності та комфорту постає необхідність у створенні більш гнучких систем керування мікрокліматом, здатних адаптуватися до змін навантаження та енергоресурсів, зокрема в умовах обмеженого електропостачання. Актуальним є дослідження можливості поєднання водяної системи опалення із локальними електричними обігрівачами, керованими децентралізовано, з урахуванням пріоритетів зон та поточних відхилень температури.

Модель для дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку побудована на підставі прикладу “House Heating System” математичного пакету MATLAB R2024b [12]. Будинок поділено на чотири однакові кімнати загальною площею 100 м² та висотою 2,5 м. У кожній кімнаті знаходиться по вікну площею 2,25 м² та радіатору площею 5 м². Дах будинку плоский. Температура навколишнього середовища 5 °С, початкова температура у будинку 10 °С, уставка температури системи водяного опалення 16 °С. Замість двопозиційного регулятора у системі використано пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор). У кожену кімнату додано зону теплового комфорту з електричним обігрівачем (табл. 1). Вплив температури у зоні комфорту на загальну температуру повітря у кімнаті складає 20 % від перепаду. Остання використовується для розрахунку середньої температури у будинку.

Значення параметрів для розрахунку дійсної прогнозованої середньої оцінки PMV відповідають: тип одягу 1,05 кло, швидкість обміну речовин 1,20 мет, середня температура випромінювання 25 °С, відносна швидкість повітря 0,1 м/с, початкова відносна вологість 40 %. Для обмеженої прогнозованої середньої оцінки PMV тип одягу становить 1,00 кло.

Таблиця 1 – Налаштування зони теплового комфорту

Кімната 1		Кімната 2		Кімната 3		Кімната 4	
Уставка PMV	Потужність обігрівача, Вт	Уставка PMV	Потужність обігрівача, Вт	Уставка PMV	Потужність обігрівача, Вт	Уставка PMV	Потужність обігрівача, Вт
-0,1	1600	-0,2	1500	-0,1	1100	-0,2	500

Джерело: Розроблено авторами

Удосконалена модель теплового обміну у будинку наведена на рисунку 1.

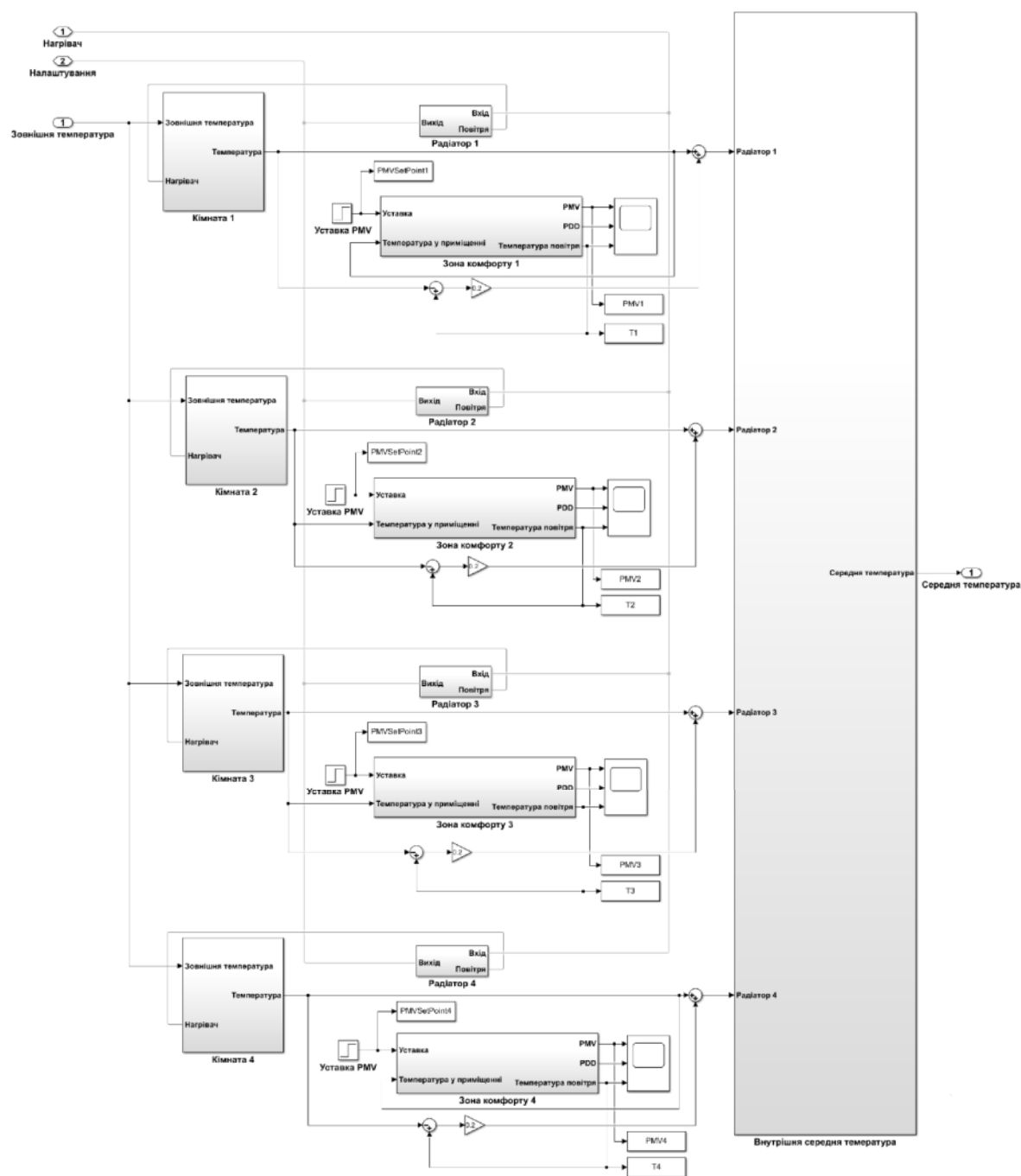


Рисунок 1 – Удосконалена модель теплового обміну у будинку

Джерело: розроблено авторами

Перевірка функціонування моделі для дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку показала (рис. 2), що початкова температура становить 10 °С. Система керування водяним опаленням на базі ПІ-регулятора підіймає загальну температуру до 16 °С. Через годину від початку прогріву будинку вмикається система керування тепловим комфортом у першій кімнаті з уставкою -0,1. Ще через півгодини вмикаються системи керування тепловим комфортом у другій та четвертій кімнатах з уставками -0,2. Після чого вмикається остання система керування з уставкою -0,1. Усі системи керування тепловим комфортом підтримують прогнозовану середню оцінку PMV на рівні уставки або близько до нього. В останньому випадку статична помилка пов'язана з триразово меншою потужністю нагрівача за однакових

налаштувань двопозиційного регулятора в усіх зонах комфорту. Таким чином отримана модель багатокімнатного будинку може бути використана при дослідженні процесу керування тепловим комфортом.

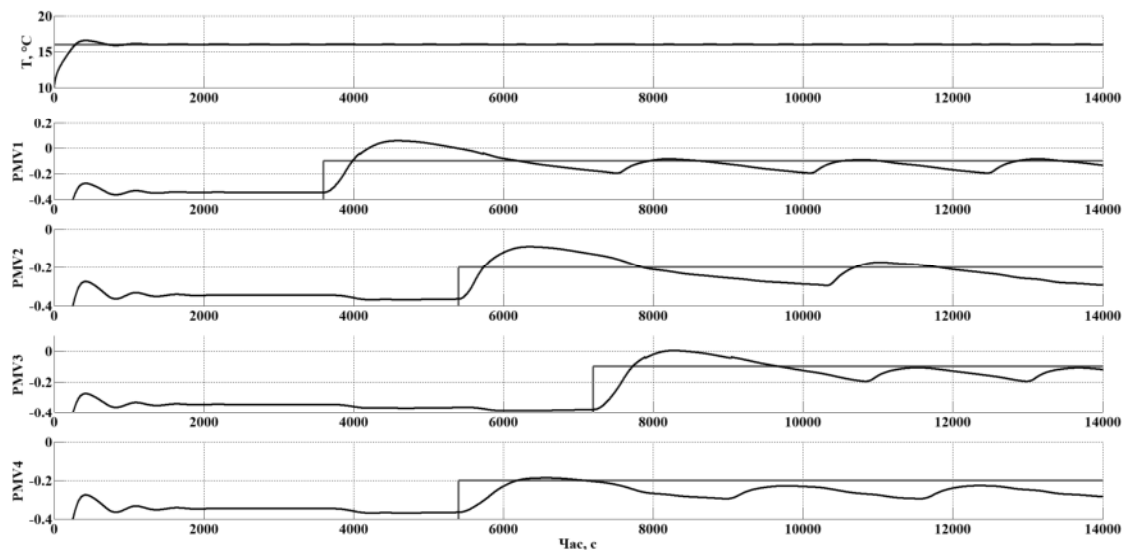


Рисунок 2 – Результат перевірки функціонування моделі для дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку

Джерело: розроблено авторами

Для визначення можливості зменшення енергетичних витрат за рахунок керування тепловим комфортом у заданих зонах необхідно встановити обсяг останніх:

$$Q_{3K} = Q_{TRMV} - Q_{PMV}, \quad (1)$$

де Q_{3K} – витрати енергії на підтримку зон комфорту, Вт; Q_{TRMV} – витрати енергії за підтримки температури відповідної до рівня прогнозованої середньої оцінки PMV, Вт; Q_{PMV} – витрати енергії за наявності керування тепловим комфортом.

За результатами дослідження впливу теплового комфорту на витрати енергоресурсів встановлено, що для загальної підтримки прогнозованої середньої оцінки PMV у будинку на рівні -0,1 необхідно витрати 53,79 кВт·год. відповідно до часу моделювання, що на 23,16 % більше за використання зон теплового комфорту, а для підтримки -0,2 достатньо 48,75 кВт·год, що відповідно більше на 11,62 % (табл. 2). Таким чином підтримка зон теплового комфорту у будинку дозволяє зменшити витрати енергоресурсів по відношенню до використання термостатів, контролерів, термостатичних клапанів та інших пристроїв за рахунок зменшення площ підвищеної температури та реалізації локального регулювання ними.

Таблиця 2 – Результати дослідження впливу теплового комфорту на витрати енергоресурсів

Назва параметра	Середня температура у будинку			Середня температура у будинку 16 °С, підтримка теплового комфорту відповідно до табл. 1	Δ
	16 °С	17 °С	18 °С		
Масова витрата, кг	3,730	4,160	4,590	3,630	0,100
Природний газ, м ³	4,140	4,621	5,099	4,029	0,111
Енергія, кВт·год.	43,677	48,752	53,794	42,506	1,171

Джерело: розроблено авторами

При використанні значних споживачів електроенергії виникає проблема пов'язана з обмеженістю потужності мережі. На відміну від газопроводів низького тиску, які зазвичай забезпечують $10 \div 24$ кВт, електрична мережа надає $3,5 \div 7,0$ кВт. Враховуючі інші побутові прилади у будинку та пікові навантаження максимальна вільна електрична потужність складає біля 3,0 кВт. Таким чином для раніше розглянутого випадку (табл. 1) за умови роботи усіх обігрівачів загальна споживана потужність становить 4,7 кВт, що призведе до перенавантаження, вимикання або руйнування електромережі. Для рішення цієї проблеми може бути використана централізована або децентралізована система керування. Остання у даному випадку має суттєві переваги пов'язані з можливістю легкого додавання і вилучання елементів системи та розподілу між ними ресурсів – доступної електричної потужності без участі додаткового обладнання. Відповідно до цього на підставі структури системи керування тепловим комфортом розроблено модель децентралізованого контролера двопозиційного регулятора призначену для керування обігрівачем на підставі запиту регулятора та обмежень наявної потужності. Параметри моделі наведені на рисунку 3.



Рисунок 3 – Параметри децентралізованого контролера двопозиційного регулятора системи керування тепловим комфортом

Джерело: розроблено авторами

У якості налаштувань децентралізованого контролера двопозиційного регулятора виступають: унікальний ідентифікатор, пріоритет доступу до потужності, максимальна допустима потужність для усіх зон теплового комфорту разом, потужність обігрівача відповідної зони комфорту, максимальний інтервал робочого часу протягом якого система керування буде використовувати отриману потужність. Вхідних параметрів: дозвіл на роботу системи керування, запити потужності від усіх наявних зон теплового комфорту, помилка системи керування, запит двопозиційного регулятора на включення або виключення обігрівача, годинник реального часу. Вихідних параметрів: керування обігрівачем, запит потужності. Останній складається з: унікального ідентифікатора, пріоритету доступу до потужності, помилки системи керування, потужності обігрівача, поточного режиму роботи системи керування зони теплового комфорту – очікування у черзі наявності вільної потужності або відпрацювання інтервалу робочого часу.

У процесі роботи кожний контролер обробляє запити потужності від усіх систем керування зонами теплового комфорту. На початку з максимальної допустимої видаляється потужність, що вже використовується. Далі видаляється потужність запитана системами керування з більш високим пріоритетом. За наявності систем з таким самим пріоритетом видаляється потужності з більшим значенням помилки керування. За однакової помилки керування більший пріоритет отримує система з

меншим унікальним ідентифікатором. У результаті розраховується значення потужності доступної даній системі керування. За наявності достатньої потужності контролер вмикає обігрівач та переходить до відпрацювання інтервалу робочого часу. По запиті двопозиційного регулятора на виключення обігрівача або закінченню робочого інтервалу часу контролер вимикає обігрівач та звільняє потужність. Графічна реалізація алгоритму функціонування децентралізованого контролера двопозиційного регулятора системи керування тепловим комфортом наведена на рисунку 4.

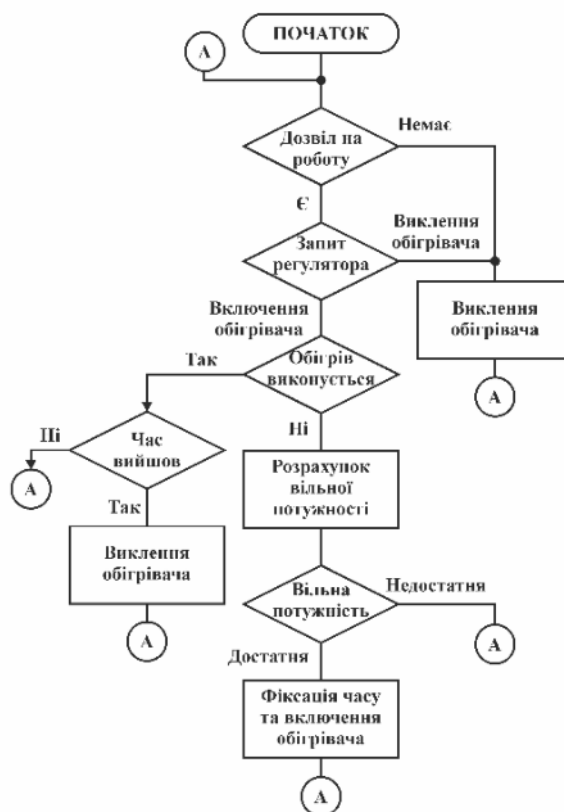


Рисунок 4 – Алгоритм функціонування децентралізованого контролера двопозиційного регулятора системи керування тепловим комфортом

Джерело: розроблено авторами

Використовуючи розглянутий контролер двопозиційного регулятора (рис. 3, 4) на базі удосконаленої моделі теплового обміну (рис. 1) розроблена модель децентралізованого керування зонами теплового комфорту у багатокімнатному будинку, налаштування якої наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Налаштування децентралізованої системи керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку

Назва параметра	Ідентифікатор	Пріоритет	Максимальна потужність, Вт	Потужність нагрівача, Вт	Інтервал часу роботи, с
Зона комфорту 1	1	1	3000	1600	60
Зона комфорту 2	2	2	3000	1500	60
Зона комфорту 3	3	2	3000	1100	60
Зона комфорту 4	4	3	3000	500	90

Джерело: розроблено авторами

Результат перевірки функціонування децентралізованої системи керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку наведено на рисунку 5. Усі зони починають функціонувати одночасно, рівень потужності протягом усього часу не перевищує обмеження. На початку потужність захоплюється 4 зоною, яка має найвищий пріоритет та 3 зоною, яка має наступний пріоритет та більшу за 2 зону помилку керування (рис. 6). Загальна споживана потужність становить 1600 Вт, що не дає можливості обігрівати 1 та 2 зони.

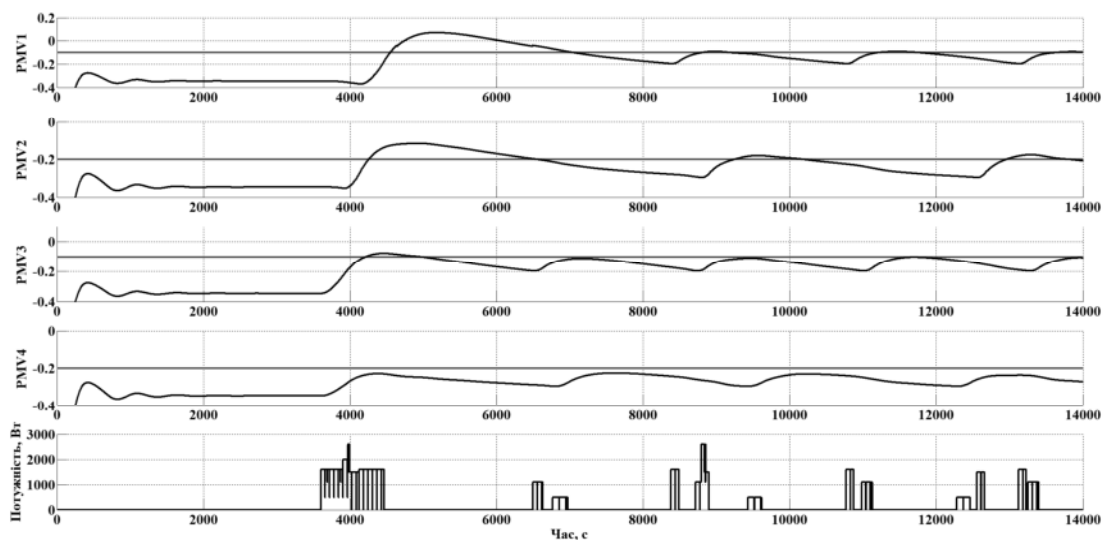


Рисунок 5 – Результат перевірки функціонування децентралізованої системи керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку

Джерело: розроблено авторами

Зменшення помилки керування у 3 зоні призводить до захоплення потужності 2 та 4 зонами з загальним споживанням 2000 Вт. Досягнення бажаного значення у 4 зоні призводить до захоплення потужності 2 та 3 зонами з загальним споживанням 2600 Вт. По закінченню нагріву 2 та 3 зони вмикається обігрівач 1 зони потужністю 1600 Вт.

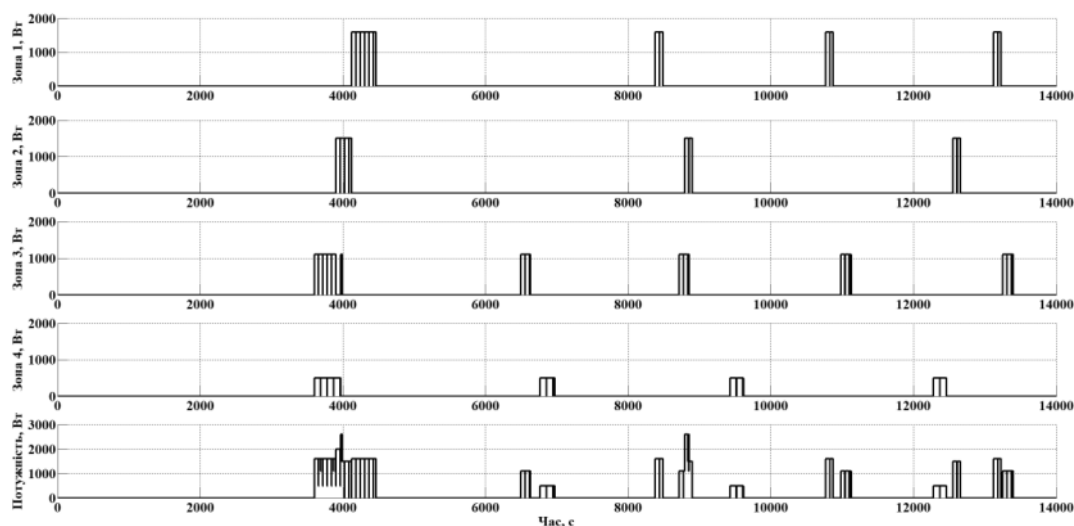


Рисунок 6 – Керування обігрівачами відповідно до зон теплового комфорту

Джерело: розроблено авторами

Використання децентралізованої системи керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку призводить до незначного перерозподілу витрат

енергоресурсів між системою водяного опалення 42,370 кВт·год. та електричним опаленням окремих зон 1,307 кВт·год. Таким чином розроблена система керування дозволяє вирішити проблему зменшення енерговитрат за умов обмеженого електропостачання.

На сьогодні найпростіша та найзручніша реалізація запропонованої децентралізованої системи керування передбачає використання принципів побудови інтернет речей. Таке рішення дозволяє організувати безпроводний зв'язок між усіма системами керування зонами теплового комфорту, дистанційну зміну налаштувань і контроль за опаленням та може бути легко інтегроване у вже існуючі системи.

Висновки. 1. Аналіз існуючих рішень опалення багатокімнатних будинків показав, що найбільш розповсюдженим є використання систем з водою у якості теплоносія. Головний недолік таких систем необхідність підтримки ними загальної температури у всіх кімнатах будинку. Використання термостатів, регуляторів, погодозалежних контролерів та термостатичних клапанів призводить до зменшення енерговитрат однак не забезпечує достатню точність керування тепловим комфортом.

2. Для дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку на базі прикладу “House Heating System” математичного пакету MATLAB R2024b розроблена удосконалена модель. в якій замість двопозиційного керування системою водяного опалення використано безперервне на базі пропорційно-інтегральний регулятор та додано чотири зони теплового комфорту.

3. За результатами дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку встановлене, що використання системи водяного опалення для підтримки загальної температури та електричних обігрівачів в обраних зонах дозволяє зменшити енерговитрати по відношенню до підтримки загальних комфортних умов тільки системою.

4. В умовах обмеженого електропостачання керування обігрівом окремих зон може забезпечуватися децентралізованою системою для чого розроблено децентралізований контролер двопозиційного регулятора системи керування тепловим комфортом. Така система розподіляє наявну електричну потужність між усіма споживачами за пріоритетом та помилкою керування.

5. Дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку з використанням децентралізованої системи показало, що запропонований підхід дозволяє знизити витрати енергоресурсів навіть за умов обмеженого електропостачання. Використання помилки керування для уточнення пріоритету підвищує якість підтримки теплового комфорту.

Список літератури

1. Yu F. et al. Techno-economic analysis of residential building heating strategies for cost-effective upgrades in European cities. *iScience*. 2023. P. 107541. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107541> (дата звернення: 31.01.2025).
2. Heating energy for a cosy home. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. URL: <https://is.gd/0i0cgU> (дата звернення: 31.01.2025).
3. 2022 Census: three-quarters of all dwellings heated by oil or gas – Zensus 2022. *Zensus 2022*. URL: <https://is.gd/89tjB6> (дата звернення: 31.01.2025).
4. Heating systems and their energy use. *REHVA Journal*. URL: <https://is.gd/nglb17> (дата звернення: 31.01.2025).
5. Heating equipment size, share & industry forecast 2034. *Market Research Future*. URL: <https://is.gd/NmEbsw> (дата звернення: 31.01.2025).
6. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort. *International Journal of Exergy*. 2004. Vol. 1, № 3. P. 303. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijex.2004.005559> (дата звернення: 18.06.2025).
7. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 662. С. 84–88.
8. ISO 7730:2005 (E). Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 3rd ed. 2005-11-15.

9. BS EN ISO 7726:2001. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. British Standards, 2001. 62 p. [Execute Date 2001/11/6].
10. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2011, IDT). Київ : Мінрегіон України, 2012. 64 с. (Чинний від 01.07.2013).
11. Mykytyuk Z., Shymchyshyn O., Zvorskyi A., Markiv D. Automation of microclimate control processes in residential premises. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*. 2024. Vol. 4 (1). P. 155–162. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2024.01.155>
12. House heating system. *MathWorks*. URL: <https://is.gd/PFK6aB> (дата звернення: 31.01.2025).

References

1. Yu, F., et al. (2023). Techno-economic analysis of residential building heating strategies for cost-effective upgrades in European cities. *iScience*, 107541. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107541>.
2. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2025, January 31). *Heating energy for a cosy home*. is.gd/0I0cgU.
3. Zensus 2022. (2025, January 31). *2022 Census: Three-quarters of all dwellings heated by oil or gas – Zensus 2022*. <https://is.gd/89tjB6>
4. REHVA Journal. (2025, January 31). *Heating systems and their energy use*. <https://is.gd/nglb17>
5. Market Research Future. (2025, January 31). *Heating equipment size, share & industry forecast 2034*. is.gd/NmEbsw.
6. Prek, M. (2004). Exergy analysis of thermal comfort. *International Journal of Exergy*, 1(3), 303. <https://doi.org/10.1504/ijex.2004.005559>.
7. Vozniak, O. T. (2010). *Influence of indoor microclimate parameters on human heat exchange*. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Theory and Practice of Construction*, (662), 84–88 [in Ukrainian].
8. International Organization for Standardization. (2005). *ISO 7730:2005 (E). Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria* (3rd ed.).
9. British Standards Institution. (2001). *BS EN ISO 7726:2001. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities* (62 p.).
10. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2012). *DSTU B EN ISO 7730:2011. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (EN ISO 7730:2011, IDT)*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. (Effective from 01.07.2013) [in Ukrainian].
11. Mykytyuk, Z., Shymchyshyn, O., Zvorskyi, A., & Markiv, D. (2024). Automation of microclimate control processes in residential premises. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, 4(1), 155–162. <https://doi.org/10.23939/ictee2024.01.155>.
12. MathWorks. (2025, January 31). *House heating system*. <https://is.gd/PFK6aB>.

Oleg Boyko, Assoc. Prof, PhD, **Yevhen Voskoboinyk**, **Yevhenii Koshelenko** Assoc. Prof, PhD

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Study of the Process of the Control of the Thermal Comfort in a Building with Several Rooms Under the Conditions of a Limited Energy Supply

The present research is concerned with the investigation of the process of regulating the heating system in a multi-room building, with a focus on the consideration of thermal comfort zones. Furthermore, the development of methodologies aimed at enhancing energy efficiency by maintaining the minimum permissible temperature is of significance. This objective is pursued by employing a combination of water heating with local heat sources exhibiting a substantial range of controllability.

The model of heat exchange in a building has been improved and an effective way of achieving the desired microclimate in the relevant zone, while minimising energy costs, has been proposed. Maintaining the minimum allowable temperature in the house through a water heating system and the use of a separate heat source with a wide range of control to maintain thermal comfort in the house. Methods to reduce energy consumption are proposed.

The findings of the study on the process of thermal comfort control in a multi-room house revealed that utilising a water heating system to maintain the overall temperature, in conjunction with electric heaters in designated zones, enables a reduction in energy consumption when compared to the energy consumption of the system alone when maintaining general comfortable conditions. In circumstances where electricity supply is constrained, the decentralised control system has been shown to facilitate zone-specific heating regulation by allocating available electrical power among all consumers based on priority and control error.

thermal comfort, microclimate, predicted average PMV, decentralised control system, internet of things, two-position controller

Одержано (Received) 18.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 681.5.004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.326-332](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.326-332)

С. Г. Ковальов, канд. пед. наук, **В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,
А. В. Гриньків, ст. дослідник, канд. техн. наук, **Ю. Г. Ковальов**, доц., канд. тех. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: aulinvv@gmail.com, kovalyovserggr@ukr.net

Особливості побудови програмної симуляції для оптимізації ефективності використання та надійності експлуатації автоматизованих виробничих ліній методами ШІ

У роботі розглядається концепція інтеграції штучного інтелекту в автоматизовану виробничу лінію через створення та впровадження комп'ютерної симуляції. Як прикладу наведено експериментальну платформу виготовлення агродронів, яка є реальним середовищем для перевірки результатів впровадження методів штучного інтелекту для її оптимізації. Симуляційна модель реалізована з використанням об'єктно-орієнтованого підходу, що забезпечує гнучкість структури та дозволяє замінювати окремі компоненти на ШІ-агентів. Інтелектуальні агенти, інтегровані в модель, виконують функції навчання, адаптації та оптимізації, спрямовані на підвищення продуктивності, зменшення простоїв і покращення якості виробництва. У дослідженні також розглянуто переваги використання цифрових двійників – віртуальних аналогів фізичних систем, що синхронізуються з реальними даними – та порівняно два типи симуляційних платформ: графічні (на базі рушіїв Unity) і консольні, які забезпечують різні рівні деталізації та контролю. Окрему увагу приділено аналізу архітектури симуляції, її модульності та потенціалу масштабування. Отримані результати можуть бути використані як основа для впровадження інтелектуальних систем управління в промислових умовах, зокрема в контексті цифровізації та переходу до гнучких виробничих середовищ.

штучний інтелект (ШІ), автоматизовані виробничі лінії, комп'ютерна симуляція, інтелектуальні агенти, оптимізація ефективності, цифрові близнюки, архітектура симуляційних моделей, інтеграція ШІ у виробництво

Постановка проблеми. Підвищення ефективності виробничих процесів залишається актуальною науковою проблемою протягом тривалого часу. У сучасних умовах ця проблема набуває особливої значущості в контексті трансформації виробництва у напрямку кіберфізичних систем, цифровізації виробничих операцій та впровадження штучного інтелекту для оптимізації ключових параметрів. Такий розвиток подій не лише актуалізує дослідження в цій сфері, а й вимагає переосмислення традиційних підходів до організації виробництва. Отже, наукове осмислення та дослідження зазначеної проблематики є важливим як з теоретичного, так і з прикладного погляду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У промисловості зростає зацікавленість у використанні цифрових технологій для вдосконалення автоматизованих систем. Одним із ключових напрямів є моделювання виробничих процесів у віртуальному середовищі, що дозволяє безпечно експериментувати, перевіряти логіку роботи та оптимізувати функціональні сценарії. Такий підхід створює основу для впровадження адаптивних агентів, здатних реагувати на зміни, аналізувати дані та приймати рішення в умовах динамічного навантаження. Особливу роль відіграє концепція цифрового двійника – віртуальної копії фізичного об'єкта, яка оновлюється в реальному часі та дозволяє прогнозувати стан системи, виявляти критичні точки й ефективно розподіляти ресурси. [1; 2; 3; 5; 6; 7; 8; 9].

© С. Г. Ковальов, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, Ю. Г. Ковальов, 2025

Симуляційні платформи Unity, Unreal Engine чи Godot дедалі частіше базуються на ігрових рушіях, що забезпечують високий рівень графічної деталізації та фізичної достовірності. Це відкриває можливості для моделювання складних виробничих ліній, де агенти можуть взаємодіяти з середовищем, аналізувати сенсорні сигнали та адаптувати свою поведінку. Поряд із цим, текстові моделі залишаються актуальними завдяки простоті реалізації, низьким вимогам до ресурсів і зручності тестування алгоритмів – зокрема моделей станів, систем планування та маршрутизації. Вони дозволяють швидко створювати прототипи та глибоко контролювати логіку без потреби у візуальному інтерфейсі. [10; 11; 12; 13; 14; 15].

Загалом, симуляції з агентами ІІІ – це не просто засіб тестування, а стратегічний інструмент архітектурного проектування виробничих систем. Вони дозволяють враховувати складність, варіативність і динаміку реального середовища, створюючи основу для самонавчальних, адаптивних і гнучких рішень. Їхнє впровадження в практику вимагає синергії знань з інженерії, програмування, аналітики та менеджменту [4].

Постановка завдання. У світлі актуальних тенденцій автоматизації та цифрової трансформації промисловості особливої уваги набуває пошук дієвих способів інтеграції штучного інтелекту в виробничі процеси. Це дослідження спрямоване на розробку комп'ютерної моделі автоматизованої лінії складання агродронів, яка слугує експериментальним стендом для апробації інтелектуальних методів оптимізації. Створена симуляція покликана стати базою для аналізу архітектурних концепцій, тестування алгоритмів навчання та оцінювання ефективності різних виробничих сценаріїв.

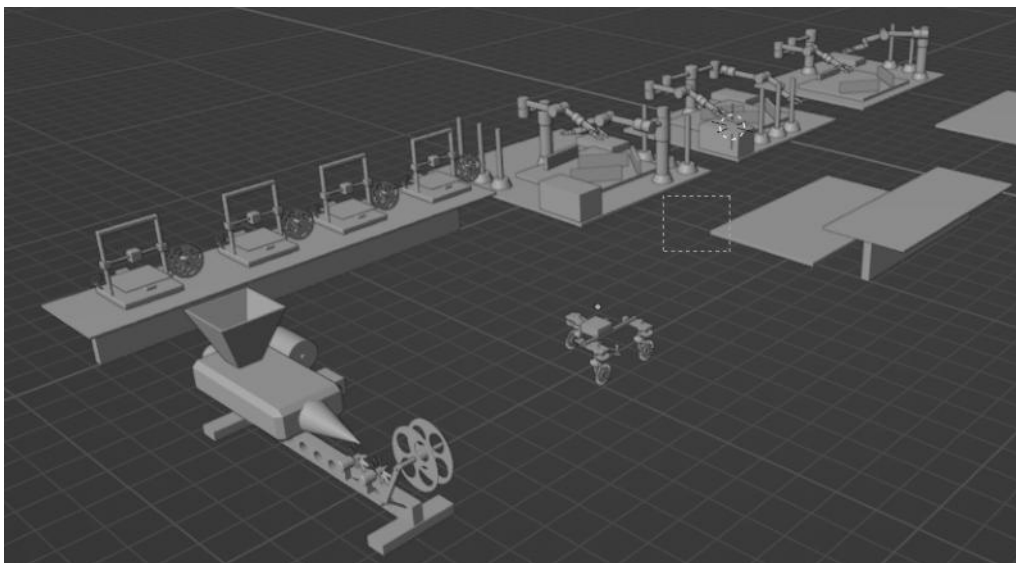


Рисунок 1 – Вигляд 3D-моделі лінії збірки агро-дронів для реалізації симуляції в ігровому рушії Unity з метою підвищення ефективності використання лінії

Джерело: розроблено авторами

Для реалізації проекту необхідно створити симуляційну модель виробничої лінії агродронів, використовуючи принципи об'єктно-орієнтованого програмування. Така структура дозволяє гнучко моделювати окремі компоненти – конвеєри, маніпулятори, вузли контролю якості, дрони – як самостійні об'єкти з власними параметрами та логікою поведінки. Модель має відтворювати реальні етапи складання, включаючи надходження деталей, виконання операцій, тестування та обробку подій у часі.

Особливу увагу слід приділити архітектурі взаємодії між об'єктами, синхронізації процесів і підготовці до інтеграції агентів, що відповідають за прийняття

рішень та адаптацію до змін. У відповідних модулях передбачено реалізацію алгоритмів оптимізації, навчання з підкріпленням або евристичних стратегій, які спрямовані на підвищення ефективності, зменшення простоїв і гнучке реагування на зміну конфігурації виробничої системи.

У межах проєкту передбачено розробку архітектури симуляційного середовища, здатного підтримувати інтеграцію інтелектуальних агентів і забезпечувати умови для їхнього функціонального розвитку – включно з навчанням, перевіркою та вдосконаленням алгоритмів. Така структура дозволяє моделювати складні виробничі сценарії з високим рівнем деталізації та гнучкості.

Очікувані результати можуть бути використані в реальних технологічних рішеннях: створенні цифрових аналогів виробничих систем, впровадженні адаптивного управління та підвищенні стабільності процесів відповідно до принципів Industry 4.0.

Викладення основного матеріалу. Оптимізація ефективності та надійності виробничої лінії методами ШІ потребує узагальненого підходу до її структури. Лінію можна розглядати як набір вузлів, що виконують виробничі операції у певній послідовності або паралельно. Для роботи кожного вузла необхідні ресурси – як ті, що надходять ззовні, так і ті, що створюються всередині системи.

Кожен елемент – вузол або операція – має характеристики, які змінюються з часом і впливають на загальний стан системи. Для опису цієї взаємодії та динаміки системи пропонуємо математичну модель, базовану на формальній логіці.

Нехай $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ – множина виробничих вузлів, $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ – множина виробничих операцій, $R_{\text{зовн}}$ – ресурси, що закуповуються а $R_{\text{внутр}}$ – ресурси, що виробляються в межах лінії.

Тоді:

$$R = R_{\text{зовн}} \cup R_{\text{внутр}}. \quad (1)$$

Кожен вузол $O_i \subseteq O$, де O_i здатні виконуватись в межах одного чи декількох вузлів послідовно, або паралельно в часі. Параметри ефективності та надійності виробничого вузла N_i , визначені в наступних межах: ефективності – $E_{ij}(t) \in [1, 0]$, надійність – $R_{ij}(t) \in [1, 0]$, $S_i(t) \in \{\text{норма, аварія, профілактика, ...}\}$. Модель функціонує у часі t , де $t \in \mathbb{R}^+$. У випадку коли параметри ефективності та надійності змінюються в часі, маємо – $E_{ij}(t)$ та $R_{ij}(t)$.

Застосування агентної оптимізації в такій системі передбачає, що агент A – це алгоритм на основі ШІ, що має доступ до множин N, O та R , при цьому агент має мету максимізувати середню ефективність та мінімізувати ризики аварій та простоїв в часі:

$$\max_A (\sum_{ij} w_{ij} E_{ij}(t)) \text{ та } \min_A (\sum_{ij} \mathbb{P}(S_i(t)) = \text{аварія}, \quad (2)$$

де w_{ij} – ваги важливості, що визначають агента.

Позначимо $E(t)$ значення параметра ефективності в момент часу (t) , α – коефіцієнт зміни параметра ефективності в часі. $U_E(t)$ – керуючий вплив агента на ефективність. У такому випадку рівняння, що визначає процес оптимізації параметра ефективності матиме вигляд:

$$\frac{dE(t)}{dt} = -\alpha E(t) + U_E(t). \quad (3)$$

Враховуючи вигляд рівняння (3) маємо рівність, що визначає мету агента при його інтеграції в систему і вимагає максимізувати функціонал:

$$j = \int_0^T (w_E E(t) + w_R R(t) - c(U_E(t), U_R(t))) dt, \quad (4)$$

де w_E, w_R – вагові коефіцієнти моделі агента, який передбачає оптимізацію ефективності та надійності виробничої лінії.

$c(U_E(t), U_R(t))$ – вартість керуючих дій, наприклад затрати відображенні в еквіваленті енергоспоживання, час переналаштування, тощо.

Врахувавши зміст та співвідношення між об'єктами розглядуваної математичної моделі виробничої лінії було створено ООП-модель автоматизованої виробничої лінії для програмної симуляції експериментальної виробничої лінії зборки агро-дронів:

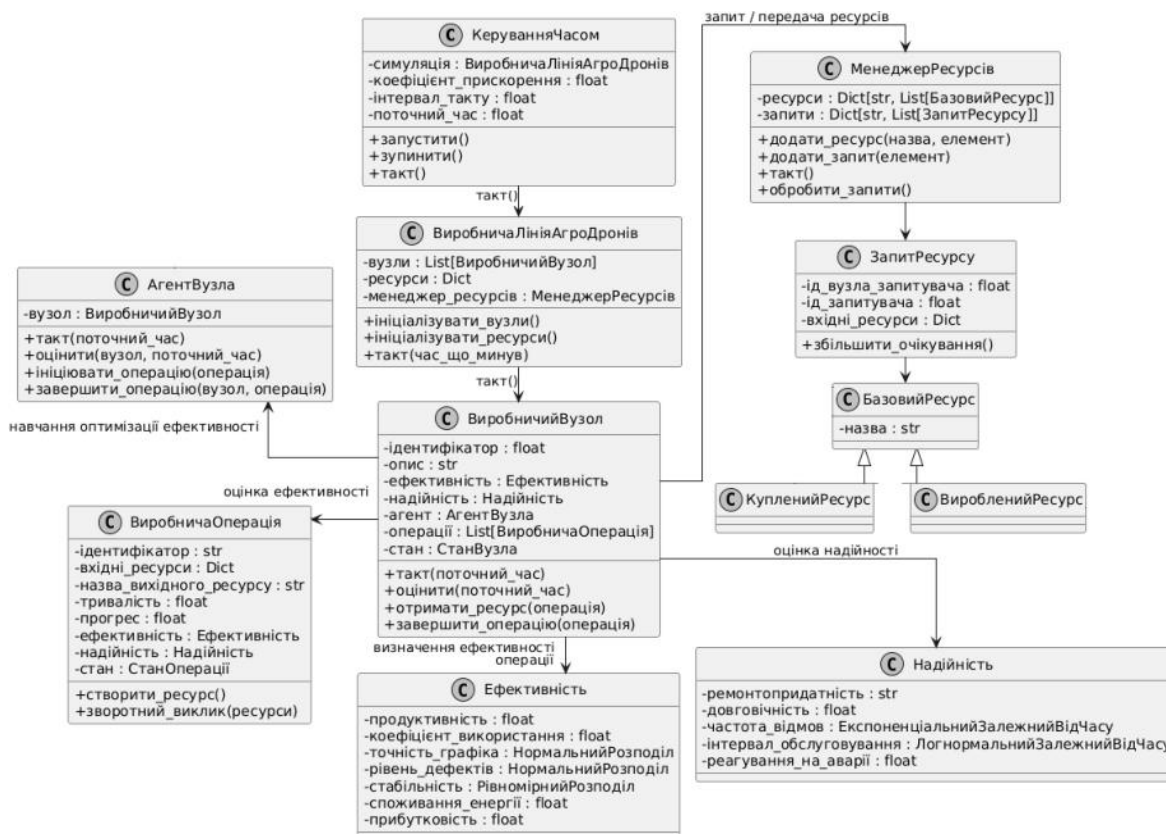


Рисунок 2 – UML модель створеної програмної симуляції автоматизованої виробничої лінії агродронів
Джерело: розроблено авторами

Основним об'єктом ООП-моделі і відповідно програмної симуляції є об'єкт класу **AgroDroneProductionLine** який містить список (тип структури даних) з ім'ям **units** у якому зберігаються усі об'єкти виробничих вузлів типу **ProductionNode**. Клас **ProductionNode** в свою чергу, вміщують об'єкти виробничих операцій **ProductionOperation**, які вони здатні виконувати.

Симуляція містить екземпляр класу **TimeManager** і його основна задача стискати реальний перебіг часу в межах виконання програми. Один раз на 10мс **TimeManager** викликає циклічно метод **Tick(time)** кожного виробничого вузла і повідомляє їм у вхідному параметрі, що час який мину рівний десяткам хвилин чи годин у залежності як налаштована симуляція. Таким чином в межах декількох реальних годин роботи програмної симуляції відтворюються роки експлуатації виробничої лінії.

Для представлення ресурсів передбачено клас **BaseResource** та його дочірні класи **PurchasedResource** і **ManufacturedResource**.

Важливим об'єктом в симуляції є також - **ResourceManager**, який виконує як

логістичні функції руху напівфабрикатів та закупівельних ресурсів між виробничими вузлами, а також виконує статистичний аналіз стану ресурсів виробничої лінії, приймає запити від виробничих вузлів на той чи інший ресурс та передає його до виробництва. В межах симуляції **ResourceManager** відіграє роль інтелектуального складу з широкими функціями, що направлені на оптимізацію процесу виробництва. **ResourceManager** також має циклічний метод **Tick(time)**, що викликається циклічно, що дозволяє відслідковувати стан наявних ресурсів, запити на ресурси та ін.

Розглядувана симуляція покликана створити умови для інтеграції методів ШІ у виробничу лінію з метою оптимізації ефективності експлуатації та надійності використання такої автоматизованої виробничої лінії. У зв'язку з цим об'єкти класу **ProductionNode** та **ProductionOperation**, містя відповідні параметри ефективності та надійності. Деякі з цих параметрів відносяться тільки до виробничого вузла типу – **ProductionNode**, а деякі до **ProductionOperation**, а також, ще частина параметрів розглядаються як спільні для вузла і операції. Розбиття параметрів ефективності і надійності на групи, що відповідають виробничому вузлу, виробничій операції чи є спільними для них в межах симуляції наведено в таблиці 1:

Таблиця 1 – Групування параметрів ефективності і надійності за їх відношенням до виробничих вузлів, виробничих операцій чи спільної залежності

Виробничий вузол	Виробнича операція	Спільні параметри
- Загальна продуктивність вузла - Рівень використання потужності - Здатність інтегрувати нові модулі - Масштабованість - Ремонтпридатність - Збережуваність - Довговічність - Частота збоїв вузла - Міжремонтні періоди - Безвідмовність вузла - Енергоспоживання - Витрати на обслуговування - Рентабельність - Обсяг відходів - Екологічна ефективність	- Точність виконання графіка - Відсоток дефектів - Стабільність технологічних параметрів - Швидкість переналаштування - Швидкість реагування на аварії - Відповідність сертифікаційним вимогам	- Екологічність - Точність виробничого графіка - Відсоток браку - Швидкість переналаштування між операціями - Відповідність сертифікаційним вимогам

Джерело: розроблено авторами

Наведені в таблиці параметри мають в більшій мірі статистичний характер і визначаються різними, але конкретними статистичними розподілами, які залежать або не залежать від часу. Така організація симуляції дозволяє вимірювати значення ефективності та надійності з плином часу як вузлів так і операцій, а також спільних показників, які можуть сягати різних значень і переводити лінію в аварійні стани, в стани де є необхідною профілактичні дії та ін.

У розглядуваній симуляції є наявними багато механізмів, які інкапсульовані, а їх робота впливає на ефективність і надійність автоматизованої лінії. Заміна таких механізмів, що працюють за стандартними правилами і виконуючи стандартні алгоритми на відповідні ШІ-агенти, тобто на самодостатні механізми на основі ШІ, що функціонують для досягнення необхідних завдань, дозволяє реалізувати механізм інтеграції методів ШІ в симуляцію, а відповідно і реальну автоматизовану.

Висновки. В статті запропоновану математичну модель виробничої лінії як системи, яка передбачає впровадження методів ШІ для оптимізації ефективності і надійності виробничої лінії та її компонентів. Співвідношення, що визначає мету функціонування агента в межах розглядуваної системи може слугувати критерієм для

оцінки похибки у процесі навчання агента на основі ШІ. Запропонована UML структура, що передбачає програмну симуляцію виробничої лінії може бути використана для постановки та розв'язання низки задач з оптимізації ефективності виробничої лінії методами ШІ.

Список літератури

1. Sajadieh S. M. M., Noh S. D. From Simulation to Autonomy: Reviews of the Integration of Artificial Intelligence and Digital Twins. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2025. Vol. 12. P. 1597–1628. DOI: 10.1007/s40684-025-00750-z.
2. Lee H., Yang H. Digital Twinning and Optimization of Manufacturing Process Flows. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2023. Vol. 145, № 11. Article 111008. DOI: 10.1115/1.4063234.
3. Li J., Yang S. X. Digital Twins to Embodied Artificial Intelligence: Review and Perspective. *Intelligent Robotics*. 2025. Vol. 5, № 1. P. 202–227. DOI: 10.20517/ir.2025.1.
4. Jeong Y. Digitalization in Production Logistics: How AI, Digital Twins, and Simulation are Driving the Shift from Model-Based to Data-Driven Approaches. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology*. 2023. Vol. 1, № 2. P. 187–200. DOI: 10.57062/ijpem-st.2023.0052.
5. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Голуб Д. В. Синергетика підвищення надійності машин використанням моделей Марківських процесів. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*: матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф., 9–10 квіт. 2019 р. Житомир: Житомирський агротехнічний коледж, 2019. С. 242–245.
6. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем / за ред. В. В. Ауліна. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2020. 428 с.
7. Ohira K., Ohira T. Solving a Delay Differential Equation Through the Fourier Transform. *Physics Letters A*. 2025. Vol. 531. Article 130138. DOI: 10.1016/j.physleta.2024.130138.
8. Derbas M., Frömel-Frybort S., Möhring H.-C., Riegler M. Accelerated Singular Spectrum Analysis and Machine Learning to Investigate Wood Machining Acoustics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 223. Article 111879. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111879.
9. Аулін В. В., Ковальов С. Г., Гриньків А. В., Варваров В. В. Алгоритм оптимізації надійності функціонування та ефективності використання виробничого обладнання методами штучного інтелекту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. I. С. 60–67.
10. Ковальов С. Г., Ковальов Ю. Г. Особливості реалізації моделі штучної нейронної мережі апаратними засобами. *Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка»*. 2024. № 6(34). С. 854–866. DOI: 10.52058/2786-6025-2024-6(34).
11. Barillaro L. Deep Learning Platforms: Keras. *Reference Module in Life Sciences*. 2024. January. DOI: 10.1016/B978-0-323-95502-7.00092-0.
12. Pandya S., Ghayvat H. Ambient Acoustic Event Assistive Framework for Identification, Detection, and Recognition of Unknown Acoustic Events of a Residence. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. Vol. 47. Article 101238. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101238.
13. Аулін В. В., Ковальов С. Г., Гриньків А. В., Варваров В. В. Підвищення надійності та ефективності експлуатації виробничих ліній методами штучного інтелекту, використовуючи моніторинг акустичних сигналів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. II. С. 142–151. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.142-151.
14. Kovalov S. G., Aulin V. V., Gryniv A. V., Kovalov Yu. G. Modeling the Stochastic State Matrix of a Production Line for Optimize its Operational Reliability Using Reinforcement Learning. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 11(42), Part II. P. 195–203. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.195-203.
15. Ковальов С. Г. Оптимізація часу виробництва за допомогою методу навчання з підкріпленням як частинний випадок підвищення ефективності автоматизованих виробничих ліній. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), Ч. I. С. 198–205. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.198-205.

References

1. Sajadieh, S.M.M., & Noh, S. D. (2025). From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 12, 1597–1628. <https://doi.org/10.1007/s40684-025-00750-z>
2. Lee, H., & Yang, H. (2023). Digital twinning and optimization of manufacturing process flows. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 145 (11), 111008. <https://doi.org/10.1115/1.4063234>
3. Li, J., & Yang, S. X. (2025). Digital twins to embodied artificial intelligence: Review and perspective. *Intelligent Robotics*, 5(1), 202–227. <https://doi.org/10.20517/ir.2025.1>
4. Jeong, Y. (2023). Digitalization in production logistics: How AI, digital twins, and simulation are driving the shift from model-based to data-driven approaches. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology*, 1(2), 187–200. <https://doi.org/10.57062/ijpem-st.2023.0052>
5. Aulin, V. V., Gryniv, A. V., Lysenko, S. V., & Holub, D. V. (2019). Synergetics of improving machine

- reliability using Markov process models. In **Proceedings the Development of Structures and Technical Service of Agricultural Machinery and Tools: materialy pyatoi vseukrainskoi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 242–245). Zhytomyr: Zhytomyr Agricultural College [in Ukrainian]
6. Aulin, V. V. (Ed.). (2020). *Methodological foundations for the design and operation of intelligent transport and production systems*. Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V. F. [in Ukrainian]
 7. Ohira, K., & Ohira, T. (2025). Solving a delay differential equation through the Fourier transform. *Physics Letters A*, 531, 130138. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.130138>
 8. Derbas, M., Frömel-Frybort, S., Möhring, H.-C., & Riegler, M. (2025). Accelerated singular spectrum analysis and machine learning to investigate wood machining acoustics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111879. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111879>
 9. Aulin, V. V., Kovalov, S. H., Grynkyv, A. V., & Varvarov, V. V. (2024). Optimization algorithm for reliability and efficiency of production equipment using artificial intelligence methods. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10 (41), Part I, 60–67. [in Ukrainian]
 10. Kovalov, S. H., & Kovalov, Yu. H. (2024). Features of implementing artificial neural network models in hardware. *Science and Technology Today. Series: Engineering*, 6(34), 854–866. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34))
 11. Barillaro, L. (2024). Deep learning platforms: Keras. In *Reference Module in Life Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00092-0>
 12. Pandya, S., & Ghayvat, H. (2021). Ambient acoustic event assistive framework for identification, detection, and recognition of unknown acoustic events of a residence. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101238. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101238>
 13. Aulin, V. V., Kovalov, S. H., Grynkyv, A. V., & Varvarov, V. V. (2024). Improving reliability and efficiency of production lines using artificial intelligence and acoustic signal monitoring. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10 (41), Part II. 142–151 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.142-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.142-151)
 14. Kovalov, S. H., Aulin, V. V., Grynkyv, A. V., & Kovalov, Y. H. (2025). Modeling the stochastic state matrix of a production line to optimize its operational reliability using reinforcement learning. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11 (42), Part II. 195–203. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.195-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.195-203)
 15. Kovalov, S. H. (2025). Production time optimization using reinforcement learning as a case of improving automated production line efficiency. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11 (42), Part I. 198–205 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.198-205](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.198-205)

Serhii Kovalov, PhD ped. sci., Viktor Aulin, Prof., DSc., Andrii Hrynkiv, PhD tech. sci.,

Yurii Kovalov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Features of Building Software Simulation to Optimize the Efficiency and Reliability of Automated Production Lines Using AI Methods

This article explores a methodological approach to integrating artificial intelligence (AI) into automated production lines through the development of computer-based simulations. As a case study, the research focuses on an experimental assembly line for agricultural drones, designed to serve as a testbed for intelligent optimization strategies. The simulation is constructed using object-oriented programming principles, enabling modularity, scalability, and architectural clarity. Each component of the production line—conveyors, manipulators, quality control nodes, and drone modules—is modeled as an independent object with defined behaviors and interaction protocols.

A key objective of the study is to replace selected elements of the simulation architecture with AI-driven agents capable of learning and adapting to dynamic production conditions. These agents implement reinforcement learning algorithms and heuristic decision-making strategies aimed at improving the overall efficiency, reliability, and responsiveness of the manufacturing process. The simulation environment supports both graphical implementations, using modern game engines such as Unity, and console-based models developed in Python or C++, allowing for comparative analysis of performance, flexibility, and integration potential.

The concept of digital twins is central to the proposed framework, providing a virtual mirror of the physical production system that can be used for predictive analytics, resource optimization, and real-time decision support. The study highlights the advantages of simulation-based AI integration, including reduced development risk, accelerated prototyping, and enhanced system transparency. Minor limitations, such as abstraction gaps and computational overhead, are acknowledged and discussed.

Overall, the research contributes to the architectural foundations of intelligent manufacturing systems by demonstrating how simulation environments can serve as platforms for testing, training, and deploying AI agents. The findings are relevant to developers of industrial automation, digital twin frameworks, and adaptive control systems seeking to enhance production line performance through intelligent technology.

artificial intelligence (AI), automated production lines, computer simulation, intelligent agents, efficiency optimization, digital twins, simulation model architecture, integration of AI into production

Одержано (Received) 15.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 621.4.001.4:681.2;681.5;621.3 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.333-341](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.333-341)

Г. О. Корогод, канд. техн. наук, Н. В. Чупринка, доц., канд. техн. наук,

А. М. Кириченко, канд. техн. наук

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

e-mail: korogod.go@knutd.com.ua, chuprinka.nv@knutd.com.ua, kirichenko.am@knutd.com.ua

Комп'ютерне моделювання впливу надлишковості на точність визначення поточних параметрів логарифмічної функції перетворення сенсора

Досліджено вплив значень каліброваних потоків випромінювання на точність визначення параметрів логарифмічної функції перетворення фотодіода, а також визначені взаємозалежності параметрів між собою. Встановлено, що для отримання високоточних значень параметрів функції перетворення необхідно сформувати надлишкові такти вимірювання каліброваних потоків випромінювання фіксованих значень. Проаналізовано вплив величини відхилення темного потоку на точність визначення параметрів логарифмічної функції перетворення фотодіода.

параметри логарифмічної функції перетворення, надлишковість, калібровані потоки випромінювання

Постановка проблеми. В рамках тенденцій сучасного виробництва та при наукових дослідженнях необхідно дотримуватися високих норм контролю якості вимірювання. На точність результату вимірювання головним чином впливає точність самого сенсора, оскільки від точності вимірювання сенсора залежить точність всьому подальшого вимірювання. На точність сенсора, в свою чергу, впливають різні фактори, серед яких основними є стабільність параметрів функції перетворення сенсора, вид функції перетворення сенсора та діапазон вимірювання. Визначення і контроль параметрів сенсора є однією з головних підстав для отримання достовірної інформації оскільки дозволяє своєчасно виявити відхилення в роботі сенсора та всієї автоматизованої системи в цілому. Таким чином, існує необхідність у безперервному моніторингу сенсорів та у вдосконаленні підходів по визначенню метрологічної надійності сенсорів та їх калібруванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На вирішення питань щодо визначення поточних значень параметрів функції перетворення сенсорів присвячено багато наукових праць. Так, в роботі [1] пропонується метод оптимізації процесу калібрування резистивних датчиків температури на основі вимірювання постійної часу. В роботі [2] запропонована модель використання нелінійного поліноміального алгоритму для зменшення впливу температури на точність вимірювання. Однак, в зазначених роботах не було висвітлено можливості визначення поточних значень параметрів функції перетворення сенсора з метою проведення метрологічного контролю. Дослідженнями в роботах [3–5] підкреслюють важливість розробки нових концепцій оцінки невизначеності вимірювань, а також упереджувати поступові відмови з заданою ймовірністю для забезпечення відповідності сучасним вимогам і стандартам. Як одним з підходів у аналізі надійності сенсора є моделювання терміну служби сенсора за розподілом Вейбулла при різних вхідних даних [6]. Застосування математичних підходів по упорядкуванню пар вхідних даних відповідно до їх відносної важливості та отримання стабільних значень також розглядалися в роботі [7]. У дослідженні [8] було запропоновано ймовірнісну модель для розділення впливу навколишнього середовища та внутрішнього дрейфу пристрою, що підвищує точність

визначення змін характеристик сенсора. При побудови цієї моделі аналізуються дані тривалого експерименту, що є не завжди прийнятним для швидкоплинних процесів. На самостійний вияв та діагностування робочого стану самих датчиків направлена робота [9]. Однак для цього застосовується система багатосенсорного об'єднання, що також може вносити похибки в результат вимірювання через не співпадіння характеристик сенсорів. В роботі [10] було запропоновано використання перемикаючого фільтра Калмана для корекції збоїв у роботі сенсорів. Цей метод є достатньо стійким до можливих хибних сигналів з сенсора завдяки можливості вибору найбільш підходящої моделі вимірювань серед інших моделей, що відповідають встановленим сценаріям несправності. Такий підхід потребує наявності великої кількості моделей, що не завжди можуть безпосередньо описати всі стани несправності, а також потребують ефективної обробки великої кількості даних. В роботі [11] показано, що використання безсерверних архітектур та стандартів цифрової комунікації, таких як OPC-UA, сприяє забезпеченню точності та надійності вимірювань у розподілених сенсорних мережах. В роботі [12] була представлена адаптивна математична модель вагового агрегування з багатофакторною оцінкою обробки потоків із різнорідних сенсорів.

Незважаючи на практичну і наукову значущість зазначених результатів, не було розглянуто в повній мірі можливість безпосереднього визначення поточних значень параметрів при нелінійній функції перетворення (ФП) сенсора. Для комплексного вирішення поставленої задачі успішно застосовуються методи надлишкових вимірювань [13–16]. Так, в роботі [13] були представлені рівняння надлишкових вимірювань параметрів логарифмічної ФП сенсора без проведення додаткових заходів по її лінеаризації. В роботі [16] описано вплив значень каліброваних потоків випромінювання на точність самого вимірювання, але не було визначено їх вплив на точність визначення поточних параметрів ФП сенсора. Тому, дослідження методів надлишкових вимірювань по впливу значень каліброваних потоків випромінювання на точність визначення параметрів нелінійної ФП сенсора є актуальною.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення точності вимірювання поточних значень параметрів нелінійної функції перетворення сенсора

Виклад основного матеріалу. Як було зазначено в роботах [13–16], методи надлишкових вимірювань (МНВ) є ефективними при роботі з нелінійною ФП на всій вхідній характеристиці сенсора, а також надають можливість визначити поточні параметри сенсора.

В роботі для проведення моделювання в якості сенсора було обрано фотодіод як один з найбільш затребуваних на виробництві. Як відомо, функція перетворення (ФП) фотодіода, що описує його роботу в фотогальванічному режимі (з навантаженням), має вигляд:

$$U'_R = S'_H \ln \left(\frac{\Phi_x}{\Phi_T} + 1 \right) - U_{RM}. \quad (1)$$

де U_R – напруга на навантаженні;

S'_H – тепловий потенціал ($kT/q = S'_H$, де k – стала Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура навколишнього середовища або блоку стабілізації температури; q – заряд електрона ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл));

Φ_x – потік оптичного випромінювання, що падає на фотодіод;

Φ_T – темновий потік фотодіода ($S_I/I_s = 1/\Phi_T$ де S_I – струмова (монохроматична) чутливість фотодіода; I_s – темновий струм фотодіода);

U_{RM} – падіння напруги на омичних елементах діода.

Для визначення параметрів функції перетворення фотодіода S'_H та U_{RM} за допомогою МНВ, необхідно сформулювати надлишковість і побудувати відповідну математичну модель МНВ. Математична модель МНВ представляє собою систему рівнянь величин, що описують такти вимірювання не лише фізичної величини, що вимірюється, а також такти вимірювання нормованих величин однієї природи з вимірювальною. Кількість таких тактів, що складають собою один цикл вимірювання, залежить від кількості невідомих величин, які потрібно визначити. Оскільки розглядається можливість визначення двох параметрів ФП (S'_H та U_{RM}), то необхідно сформулювати два додаткових такти вимірювання нормованих величин – каліброваних за значеннями потоків випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$ [13]. В результаті формування тактів вимірювання таких каліброваних потоків, отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} U'_{R1} = S'_H \ln((\Delta\Phi/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \\ U'_{R2} = S'_H \ln((\Phi_0/\Phi_T)+1) - U_{RM}. \end{cases} \quad (2)$$

Згідно з [13] визначення параметрів S'_H та U_{RM} здійснюється відповідно до виразів:

$$S'_H = \frac{U'_{R2} - U'_{R1}}{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)} \quad (3)$$

та

$$U_{RM} = S'_H \ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + 1\right) - U'_{R1} = (U'_{R2} - U'_{R1}) \frac{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + 1\right)}{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)} - U'_{R1}. \quad (4)$$

В роботі науковий інтерес представляло дослідження впливу значень каліброваних потоків випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$ на точність визначення параметрів S'_H та U_{RM} згідно з рівнянь (3) і (4), а також визначення взаємозалежності параметрів S'_H та U_{RM} між собою.

Комп'ютерне моделювання проводилося на прикладі кремнієвого фотодіода ФД307 з параметрами: темновий струм фотодіода $I_s=0,003$ мкА, струмова чутливість $S_{lk}=0,27$ А/Вт (при $\lambda=0,55$ мкм). На основі прийнятих виразів, були отримані наступні значення: темнового потоку $\Phi_T=1,11 \cdot 10^{-8}$ Вт та крутизни перетворення $S'_H=0,025$ (при температурі навколишнього середовища $T=20^\circ\text{C}$). Нормовані за значенням потоки оптичного випромінювання обрані, відповідно, $\Phi_0=0,05$ Вт і $\Delta\Phi_0=0,80$ Вт.

Для визначення взаємних зв'язків параметрів S'_H та U_{RM} було проведено дослідження кожного параметра окремо.

Визначення поточного значення параметра S'_H проводилися згідно з рівнянням (3) при значеннях каліброваних потоків $\Phi_0=0,05$ Вт і $\Delta\Phi_0=0,80$ Вт з похибкою відтворення $1 \cdot 10^{-7}$ Вт, а також при різних значеннях відхилень параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень.

Спочатку розглядався випадок, коли при вимірюваннях в перших двох тактах, згідно з (2), відхилення кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень

становило $\pm 1\%$. В результаті обробки даних за рівнянням надлишкових вимірювань були отримані значення параметра S'_H , що лежить в межах від 0,025455 до 0,025042. Отримані значення відповідають відхиленню параметра S'_H в межах 0,82 %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 1% на 0,18%. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H лежать в межах $\pm 1\%$, а зміна U_{RM} в межах $\pm 10\%$. Це свідчить про незалежність результату визначення параметра S'_H від величини відхилення параметра U_{RM} .

Розглядався також випадок, коли при вимірюваннях в перших двох тактах, згідно з (2), відхилення кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень становило $\pm 10\%$. В результаті обробки даних за рівнянням надлишкових вимірювань були отримані значення параметра S'_H , що лежить в межах від 0,02772 до 0,02276. Отримані значення відповідають відхиленню параметра S'_H в межах (9,80÷9,84) %, що відрізняється від змодельованого значення в 10% на (0,2÷0,16)%. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H залишалися в межах $\pm 10\%$, а зміна U_{RM} була зменшена до меж $\pm 1\%$. Це підтверджує раніше зроблений висновок про незалежність результату визначення параметра S'_H від величини відхилення параметра U_{RM} .

Подальші дослідження були направлені на встановлення залежності точності визначення параметра S'_H від значення каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$. Для цього була застосована вбудована функція «Розв'язувач» табличного редактора Excel. В результаті були знайдені значення потоків: $\Phi_0 = 0,08$ Вт та $\Delta\Phi = 0,008$ Вт, при яких забезпечується отримання значення параметра S'_H максимально приближеного до його реального значення (з похибкою визначення параметра 0,0005%). Слід зазначити, що такі значення були отримані при умові, що за час проведення циклу вимірювання зміни параметрів ФП повинні залишатися сталими.

Для визначення залежності параметра U_{RM} від параметра S'_H були розглянуті аналогічні випадки при значеннях каліброваних потоків $\Phi_0 = 0,05$ Вт і $\Delta\Phi_0 = 0,80$ Вт з похибкою відтворення $1 \cdot 10^{-7}$ Вт.

Для випадку, коли відхилення кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень становило $\pm 1\%$, були отримані значення параметра U_{RM} , що лежить в межах від 0,0096 до 0,0104 В. Отримані значення відповідають відхиленню параметра U_{RM} в межах (3,74÷3,67)%, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 1% на (2,74÷2,67) %. У випадку, коли відхилення параметра S'_H збільшено до $\pm 10\%$, а зміна U_{RM} залишається в межах $\pm 1\%$, розраховане значення параметра U_{RM} буде приймати значення від 0,0096 В до 0,0103 В. Отримані значення відхилень параметра U_{RM} будуть лежати в межах (4,16÷3,24) %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 1% на (3,16÷2,24) %.

При вимірюваннях з відхиленням кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень в межах $\pm 10\%$, були отримані значення параметра U_{RM} , що лежить в межах від 0,0105 В до 0,0094 В. Отримані значення відповідають відхиленню параметра U_{RM} в межах (4,83÷5,75) %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 10% на (7,26÷4,25) %. У випадку, коли при вимірюваннях в перших двох тактах відхилення параметра S'_H лежать в межах $\pm 1\%$, а зміна U_{RM} в межах $\pm 10\%$, розраховане значення параметра U_{RM} буде приймати значення від 0,0105 В до 0,0095 В. Отримані значення відповідають відхиленню параметра U_{RM} в межах (5,25÷5,32) %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 10% на (4,75÷4,68) %.

Таким чином, дослідження показали, що похибка визначення поточного значення параметра U_{RM} залежить як від значень відхилень самого параметра U_{RM} , так і

від значень відхилення параметра S'_H . Крім того, різниця відхилень мінімального і максимального значення параметра U_{RM} в кожного окремого випадку свідчить і про залежність від значень каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$.

На основі залежності параметра U_{RM} від значень відхилення параметра S'_H і раніше розрахованих оптимальних значень каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$, були проведені аналогічні розрахунки параметра U_{RM} при наступних даних: $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт.

В результаті чого, були отримані наступні результати:

1. При обробці даних за рівнянням надлишкових вимірювань (4) і при відхиленні кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень, що становило $\pm 1\%$, було отримане значення відхилення параметра U_{RM} , яке становить $0,98\%$, що забезпечує відносну похибку визначення поточного значення параметра U_{RM} в межах $0,02\%$. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H лежать в межах $\pm 10\%$, а зміна U_{RM} в межах $\pm 1\%$.

2. При обробці даних за рівнянням надлишкових вимірювань (4) і при відхиленні кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень в межах $\pm 10\%$ були отримані значення відхилення параметра U_{RM} в межах $(9,97\div 9,98)\%$, що забезпечує відносну похибку визначення поточного значення параметра U_{RM} в межах $(0,03\div 0,02)\%$. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H лежало в межах $\pm 1\%$, а зміна U_{RM} залишалася в межах $\pm 10\%$.

Таки чином, при значеннях потоків: $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт також забезпечується отримання значення параметра U_{RM} максимально приближеного до його реального значення (з похибкою визначення параметра $(0,03\div 0,02)\%$).

В результаті дослідження було встановлено, що шляхом встановлених оптимальних значень каліброваних потоків $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт отримують значення параметрів S та U_{RM} , які максимально приближеними до їх поточних значень.

В роботі також розглянуто вплив параметра Φ_t на результат визначення поточних значень величин U_{RM} та S'_H . Дослідження проводилося при рекомендованих значеннях каліброваних потоків $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт з похибкою відтворення $1\cdot 10^{-7}$ Вт, а також при відхиленнях параметрів U_{RM} та S'_H в межах $\pm 10\%$. В результаті були отримані наступні результати, які наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив відхилень параметра Φ_t на результат визначення поточних значень параметрів U_{RM} та S'_H

Відхилення параметра Φ_t від номінального значення (%)	Похибка визначення параметра U_{RM} (%)	Похибка визначення параметра S'_H (%)
$\pm 10\%$	$(24,04\div 26,58)\%$	$0,0005\%$
$\pm 1\%$	$(2,49\div 2,52)\%$	$0,0005\%$
0%	$0,02\%$	$0,0005\%$

Джерело: розроблено авторами

Аналіз табл.1 показав, що відхилення параметра Φ_t від номінального значення в межах $\pm 10\%$ значно впливає на визначення параметра U_{RM} і не впливає на визначення параметра S'_H . На думку авторів, це пов'язано з фізичними властивості даних параметрів: S'_H пов'язаний з навколишньою температурою, а U_{RM} та Φ_t – з конструктивними параметрами самого сенсора.

Для встановлення впливу каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ на точності визначення параметра U_{RM} при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$ також був використаний

табличний редактор Excel. При застосованні вбудованої функції «Розв'язувач» за допомогою симплекс-методу було встановлено, що для отримання значення параметра U_{RM} максимально приближеного до його реального значення необхідно встановити наступні значення каліброваних потоків: $\Phi_0=2,95 \cdot 10^{-5}$ Вт та $\Delta\Phi=1,59 \cdot 10^{-3}$ Вт. Однак, при визначенні параметра S'_H такі значення каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ проводять до збільшення відносної похибки визначення параметра S'_H з 0,0005% до 0,08%.

Подальші дослідження впливу значень каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ на похибки визначення поточних значень параметрів U_{RM} та S'_H , наведені в табл. 2 і 3:

Таблиця 2 – Вплив параметрів Φ_0 та $\Delta\Phi$ на похибку визначення поточних значень U_{RM} (%) при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$

$\Phi_0(\text{Вт})$	$\Delta\Phi (\text{Вт})$										
	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$3.19 \cdot 10^{-3}$	$4.79 \cdot 10^{-3}$	$5.59 \cdot 10^{-3}$	$6.39 \cdot 10^{-3}$	$7.19 \cdot 10^{-3}$	$8.79 \cdot 10^{-3}$	$9.59 \cdot 10^{-3}$	$10.39 \cdot 10^{-3}$	$11.19 \cdot 10^{-3}$
$2.95 \cdot 10^{-5}$	0.002	0.142	0.231	0.341	0.378	0.409	0.436	0.478	0.495	0.511	0.525
0.008	2.403	2.426	2.439	2.454	2.458	2.461	2.464	2.469	2.470	2.472	2.473
0.016	2.423	2.444	2.455	2.467	2.471	2.474	2.476	2.480	2.482	2.483	2.484
0.024	2.432	2.451	2.462	2.473	2.477	2.479	2.481	2.485	2.486	2.487	2.488
0.032	2.437	2.455	2.466	2.476	2.480	2.482	2.484	2.488	2.489	2.490	2.491
0.040	2.440	2.458	2.468	2.479	2.482	2.484	2.486	2.489	2.491	2.492	2.492
0.056	2.445	2.462	2.472	2.482	2.485	2.487	2.489	2.492	2.493	2.494	2.495
0.064	2.447	2.464	2.473	2.483	2.486	2.488	2.490	2.492	2.494	2.494	2.495
0.072	2.448	2.465	2.474	2.483	2.486	2.489	2.490	2.493	2.494	2.495	2.496
0.080	2.449	2.466	2.475	2.484	2.487	2.489	2.491	2.494	2.495	2.496	2.496
0.096	2.451	2.467	2.476	2.485	2.488	2.490	2.492	2.495	2.496	2.496	2.497
0.104	2.452	2.468	2.477	2.486	2.489	2.491	2.492	2.495	2.496	2.497	2.498

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Вплив параметрів Φ_0 та $\Delta\Phi$ на похибку визначення поточних значень S'_H (%) при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$

$\Phi_0(\text{Вт})$	$\Delta\Phi (\text{Вт})$										
	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$3.19 \cdot 10^{-3}$	$4.79 \cdot 10^{-3}$	$5.59 \cdot 10^{-3}$	$6.39 \cdot 10^{-3}$	$7.19 \cdot 10^{-3}$	$8.79 \cdot 10^{-3}$	$9.59 \cdot 10^{-3}$	$10.39 \cdot 10^{-3}$	$11.19 \cdot 10^{-3}$
$2.95 \cdot 10^{-5}$	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
0.008	0.003	0.002	0.002	0.0016	0.0015	0.0014	0.0013	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011
0.016	0.0025	0.0019	0.0016	0.0012	0.0011	0.0010	0.0010	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008
0.024	0.0022	0.0016	0.0013	0.0010	0.0009	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006
0.032	0.0020	0.0015	0.0012	0.0009	0.0008	0.0008	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
0.040	0.0019	0.0014	0.0011	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005
0.056	0.0017	0.0013	0.0010	0.0008	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004
0.064	0.0017	0.0012	0.0010	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
0.072	0.0016	0.0012	0.0010	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
0.080	0.0016	0.0012	0.0009	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
0.096	0.0015	0.0011	0.0009	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
0.104	0.0015	0.0011	0.0009	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004

Джерело: розроблено авторами

Аналіз таблиць 2 і 3 показав, що при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$ збільшення значень параметрів Φ_0 та $\Delta\Phi$ для параметра U_{RM} призводить до збільшення похибки визначення, а для параметра S'_H – до зменшення. Це свідчить про те, що навіть шляхом корегування потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ неможливо виключити вплив похибки відтворення потоку Φ_t на точність одночасного визначення параметрів U_{RM} та S'_H . Тож,

наявність відхилення потоку Φ_T від його нормованого значення свідчить про конструктивні зміни в самому сенсорі, що є сигналом для його заміни.

Для визначення поточного значення величини Φ_T , згідно з [13], необхідно провести додатковий 3й такт вимірювання каліброваного потоку, який складається з двох потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$. В цьому випадку система (2) прийме вид (5):

$$\begin{cases} U'_{R1} = S'_H \ln((\Delta\Phi_0/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \\ U'_{R2} = S'_H \ln((\Phi_0/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \\ U'_{R3} = S'_H \ln(((\Phi_0 + \Delta\Phi_0)/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \end{cases} \quad (5)$$

В результаті рішення системи (5) отримаємо наступний вираз:

$$\frac{(U'_{R2} - U'_{R1})}{(U'_{R3} - U'_{R2})} = \frac{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + 1\right)}. \quad (6)$$

З рівняння (6) значення величини Φ_T можна отримати шляхом використання методу ітерацій. Якщо отримане значення Φ_T буде відрізнятися від номінального більше ніж на 1%, то це свідчить про метрологічну ненадійність сенсора.

Висновки. В результаті застосування МНВ для фотодіоду з логарифмічною ФП, були отримані наступні висновки: 1) визначення поточного значення параметра S'_H не залежить від відхилень параметра U_{RM} , 2) визначення поточного значення параметра U_{RM} залежить як від відхилень параметра S'_H , та і від значень відхилень самого параметра U_{RM} , 3) значення каліброваних потоків Φ_0 і $\Delta\Phi$ впливають на точність визначення поточних значень параметрів S'_H та U_{RM} , 4) для отримання значення параметрів S'_H та U_{RM} , що максимально приближені до їх поточних значень, необхідно встановити значення каліброваних потоків $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт, 5) на точність визначення параметра U_{RM} сильний вплив має також і величина темнового потоку Φ_T , 6) відхилення величини Φ_T від номінального значення свідчить про конструктивні зміни сенсора, що є сигналом до його заміни. Рекомендоване відхилення Φ_T не повинно перевищувати 1%.

Список літератури

1. Klebba M., Frącz A., Brodzicki M., Rzepkowska A., Wąż M. Time constant as the main component to optimize the resistance temperature sensors' calibration process. *Sensors*. 2024. Vol. 24 (2). P. 487. DOI: 10.3390/s24020487.
2. Wang L., Tao H.-B., Dong H., Shao Z.-B., Wang F. A non-linear temperature compensation model for improving the measurement accuracy of an inductive proximity sensor and its application-specific integrated circuit implementation. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (17). P. 5010. DOI: 10.3390/s20175010.
3. Пановик У. П., Гідей Р. В., Богоніс О. О. Інтегровані метрологічні системи в індустрії 4.0. *Наукові записки Української академії друкарства*. 2024. № 1 (68). С. 71–82.
4. Глухов С., Сакович Л., Козел В., Семеха С., Бабій О. Побудова автоматизованої системи метрологічного забезпечення цифрових вимірювальних приладів з використанням інформаційних технологій. *International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects : 9th Int. Sci. and Practical Conf.* (May 19–20, 2024). № 45 (201). P. 603–607. DOI: 10.51582/interconf.19-20.05.2024.061.
5. Varshney A., Garg N., Nagla K. S., Nair T. S., Jaiswal S. K., Yadav S., Aswal D. K. Challenges in sensors technology for Industry 4.0 for futuristic metrological applications. *MAPAN*. 2021. № 2. P. 215–226. DOI: 10.1007/s12647-021-00453-1.

6. Kang Q., Lin Y., Tao J. A reliability analysis of a MEMS flow sensor with an accelerated degradation test. *Sensors*. 2023. Vol. 23 (21). P. 8733. DOI: 10.3390/s23218733.
7. Awad M., Kiese T. S., Assaghir Z., Ventura A. Convergence of sensitivity analysis methods for evaluating combined influences of model inputs. *Reliability Engineering and System Safety*. 2019. Vol. 189. P. 109–122. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.050.
8. Yang C., Bohlin G., Oechtering T. Environmental variation or instrumental drift? A probabilistic approach to gas sensor drift modeling and evaluation. *IEEE Sensors*. 2024. P. 1–4. DOI: 10.1109/SENSOR560989.2024.10784897.
9. Zhu M., Li J., Wang W., Chen D. Self-detection and self-diagnosis methods for sensors in intelligent integrated sensing system. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21 (17). P. 19247–19254. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3090990.
10. Aswal N., Sen S., Mevel L. Switching Kalman filter for damage estimation in the presence of sensor faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 175. P. 109116. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109116.
11. Гонсьор О., Демідов О. Застосування безсерверних систем для обробки метрологічних метаданих в IoT. *ISTCMTM*. 2024. Vol. 85 (4), № 4. С. 25–29. DOI: 10.23939/istcmtm2024.04.025.
12. Пановик У., Гідей Р. Математичне моделювання процесу агрегації та обробки вимірювальної інформації в автоматизованих метрологічних системах моніторингу. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2025. Vol. 82 (2). P. 37–44. URL: <https://vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/article/view/478> (дата звернення: 18.06.2025).
13. Shcherban' V., Korogod G., Chaban V., Kolysko O., Shcherban' Yu., Shchutska G. Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 98 (2/5). P. 16–22. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160830.
14. Shcherban' V., Korohod H., Chupryna N., Kolysko O., Shcherban' Y., Shchutska G. Computer analysis of multiple measurements with the sensor's quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 1 (5/121). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.273299.
15. Shcherban' V., Korohod H., Kolysko O., Kyrychenko A., Shcherban' Y., Shchutska G. Determining features in the application of redundancy for the thermistor cubic transformation function using computer simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1 (5/127). P. 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.297619.
16. Shcherban' V., Korogod G., Kolysko O., Kolysko M., Shcherban' Yu., Shchutska G. Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and Controlling System*. 2021. Vol. 2 (9/110). P. 27–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227984.

References

1. Awad, M., Kiese, T. S., Assaghir, Z., & Ventura, A. (2019). Convergence of sensitivity analysis methods for evaluating combined influences of model inputs. *Reliability Engineering and System Safety*, 189, 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.050>
2. Aswal, N., Sen, S., & Mevel, L. (2022). Switching Kalman filter for damage estimation in the presence of sensor faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 175, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109116>
3. Glukhov, S., Sakovych, L., Koziel, V., Semekha, S., & Babii, O. (2024, May 19–20). Construction of an automated system for metrological support of digital measuring instruments using information technologies. In *International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects. 9th International Scientific and Practical Conference* (No. 45 (201), pp. 603–607). <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2024.061> [in Ukrainian].
4. Honsior, O., & Demidov, O. (2024). Application of serverless systems for processing metrological metadata in IoT. *ISTCMTM*, 85(4), 25–29. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.04.025> [in Ukrainian].
5. Kang, Q., Lin, Y., & Tao, J. (2023). A reliability analysis of a MEMS flow sensor with an accelerated degradation test. *Sensors*, 23(21), 8733. <https://doi.org/10.3390/s23218733>
6. Klebba, M., Frącz, A., Brodzicki, M., Rzepkowska, A., & Wąż, M. (2024). Time constant as the main component to optimize the resistance temperature sensors' calibration process. *Sensors*, 24(2), 487. <https://doi.org/10.3390/s24020487>
7. Mykytyuk, Z., Shymchyshyn, O., Zvorskyi, A., & Markiv, D. (2024). Automation of microclimate control processes in residential premises. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, 4(1), 155–162. <https://doi.org/10.23939/ict2024.01.155>
8. Panovyk, U. P., Hidei, R. V., & Bohonis, O. O. (2024). Integrated metrological systems in Industry 4.0. *Scientific Notes of the Ukrainian Academy of Printing*, 1(68), 71–82 [in Ukrainian].
9. Panovyk, U., & Hidei, R. (2025). Mathematical modeling of the process of aggregation and processing of measurement information in automated metrological monitoring systems. *Measuring and Computing*

- Devices in Technological Processes*, 82(2), 37–44. vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/article/view/478 [in Ukrainian].
10. Shcherban', V., Korogod, G., Chaban, V., Kolysko, O., Shcherban', Yu., & Shchutska, G. (2019). Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 98(2/5), 16–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160830>
 11. Shcherban', V., Korohod, H., Chuprynka, N., Kolysko, O., Shcherban', Y., & Shchutska, G. (2023). Computer analysis of multiple measurements with the sensor's quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5/121), 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273299>
 12. Shcherban', V., Korohod, H., Kolysko, O., Kyrychenko, A., Shcherban', Y., & Shchutska, G. (2024). Determining features in the application of redundancy for the thermistor cubic transformation function using computer simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5/127), 33–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297619>
 13. Shcherban', V., Korogod, G., Kolysko, O., Kolysko, M., Shcherban', Yu., & Shchutska, G. (2021). Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and Controlling System*, 2(9/110), 27–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227984>
 14. Varshney, A., Garg, N., Nagla, K. S., Nair, T. S., Jaiswal, S. K., Yadav, S., & Aswal, D. K. (2021). Challenges in sensors technology for Industry 4.0 for futuristic metrological applications. *MAPAN*, 2, 215–226. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00453-1>
 15. Wang, L., Tao, H.-B., Dong, H., Shao, Z.-B., & Wang, F. (2020). A non-linear temperature compensation model for improving the measurement accuracy of an inductive proximity sensor and its application-specific integrated circuit implementation. *Sensors*, 20(17), 5010. <https://doi.org/10.3390/s20175010>
 16. Yang, C., Bohlin, G., & Oechtering, T. (2024). Environmental variation or instrumental drift? A probabilistic approach to gas sensor drift modeling and evaluation. *IEEE Sensors*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSOR560989.2024.10784897>
 17. Zhu, M., Li, J., Wang, W., & Chen, D. (2021). Self-detection and self-diagnosis methods for sensors in intelligent integrated sensing system. *IEEE Sensors Journal*, 21(17), 19247–19254. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3090990>

Korohod Hanna, PhD tech. sci., Nataliia Chuprynka, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Anton Kyrychenko, PhD
Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine

Computer Modeling of the Impact of Redundancy on the Accuracy of Determining the Current Parameters of the Sensor Logarithmic Transformation Function

Determination and control of sensor parameters is one of the main reasons for obtaining reliable information, since it allows timely detection of deviations in the operation of the sensor and the entire automated system as a whole. Therefore, the purpose of the work is to increase the accuracy of measuring the current values of the parameters of the nonlinear sensor transformation function.

Computer modeling was carried out using the example of a silicon photodiode FD307 photodiode with a logarithmic conversion function. As a result of the modeling, such values of calibrated fluxes were found, which ensure that the values of the parameters of the conversion function are obtained as close as possible to their real (simulated) values. At the same time, the values of the relative errors of parameter determination are hundreds and thousandths of a percent. The work also considered the influence of the dark flux parameter on the accuracy of determining the current values of the parameters of the conversion function. It was established that the deviation of the value of the dark flux value from its nominal value significantly affects the voltage value on the ohmic elements of the diode and does not affect the value of the thermal potential. For high-precision measurement of the current parameters of the conversion function, the recommended deviation of the dark flux should not exceed one percent.

As a result of applying redundant methods for a photodiode with a logarithmic transformation function, the following conclusions were obtained: 1) determining the current value of the thermal potential according to the equation of redundant measurements does not depend on the voltage deviations on the ohmic elements of the diode, 2) determining the current value of the voltage on the ohmic elements of the diode according to the corresponding equation of redundant measurements depends on the thermal potential deviations, 3) the values of the calibrated flows affect the accuracy of determining the current values of the parameters of the logarithmic transformation function, 4) to obtain the values of the parameters of the transformation function that are as close as possible to their current values, it is necessary to set fixed values of the calibrated flows, 5) the accuracy of determining the voltage on the ohmic elements of the diode is also strongly influenced by the value of the dark flux, 6) the deviation of the value of the dark flux from the nominal value indicates structural changes in the sensor, which is a signal to replace it.

logarithmic transformation function parameters, redundancy, calibrated radiation fluxes

Одержано (Received) 05.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

UDC 004.057.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.342-349](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.342-349)

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: swckntu@gmail.com

Research of Technical Characteristics of the Easy Net Everywhere Wireless Network

The results the Easy Net Everywhere wireless network technical characteristics study are presented. The network nodes with NRF24L01+, NRF24L01+PA+LNA, E01-ML01DP5 and E01-2G4M27D transceivers were investigated. The performance study was carried out using a transmitter node, a receiver node, a UART terminal, a current meter and a logic analyzer. The timing characteristics in different operating modes were investigated. The current consumption of the network nodes in data transmission mode and in deep sleep mode was measured. The results of measuring the technical characteristics of the wireless network nodes showed that the Easy Net Everywhere network has good technical characteristics. Recommendations are given for selecting the bitrate for nodes to operate in the network. Recommendations are given for selecting transceivers for battery-powered stand-alone devices.

bitrate, datagram, wireless network, easy net everywhere, network node, network characteristic

Problem statement. Nowadays it is actual to create wireless networks for controlling remote and spatially distributed objects.

The main requirements for such networks are: low battery current consumption, high bitrate, stable communication distance between network nodes, traffic crypto-security and resistance to interference.

Several wireless networks are known such as Z-Wave, ZigBee, LoRaWAN. These networks can solve a certain range of problems subject to a number of constraints. It has been found that, based on a combination of characteristics, these wireless networks are, in some cases, not capable of accomplishing their objectives. In order to solve the problem of controlling remote objects and collecting data from remote objects, the authors created a wireless network Easy Net Everywhere. The choice of network for the realization of user projects depends on the main technical characteristics of the network.

Analysis of research and publications. In the process of creating the Easy Net Everywhere wireless network, the authors analyzed the characteristics of wireless networks Wi-Fi, Z-Wave, WiMAX, ZigBee, LoRaWAN.

The technical characteristics of the networks that were described in open access documents were analyzed.

Wi-Fi networking technology is described by the standard IEEE 802.11 [1,2]. The disadvantage is the long time of connection establishment (up to 10 seconds) and high current consumption of the node (300 mA and more).

ZigBee technology is described by the standard IEEE 802.15.4 for wireless networks with routing [3-6]. ZigBee technology allows you to build topologies, star or peer-to-peer (P2P). If the network topology changes dynamically, the network cannot operate stably. The maximum communication distance between network nodes is 100 meters.

The Z-Wave network is described in the document ITU-T G.9959 [7-8]. To create network equipment, you must be a member of the Z-Wave Alliance and have a certificate. The maximum communication distance between network nodes is 100 meters.

WiMAX technology (Worldwide Interoperability for Microwave Access) described by the standard IEEE 802.16. The standard defines time-sharing multiple access technology (TDMA) [9-10]. The technology requires the use of base stations, subscriber stations and

other network equipment.

LoRaWAN technology, has both advantages and disadvantages [11-13]. The advantages include a radio transmission distance of up to 10 km in open terrain. Disadvantages: data transmission delay can reach several tens of seconds and low bandwidth 0,3-50 Kbps.

The works [14-16] present the implementation of Easy Net Everywhere network architecture and the main differences from the considered technologies. The results of analyzing the main characteristics of wireless networks are presented in Table 1.

Table 1 - Main characteristics of wireless networks

Parameter	Z-Wave	Zigbee	LoRa	Easy Net Everywhere
Transmitter power	0 dBm/ 1 mW	0 dBm/ 1 mW	до 30 dBm/ 1000 mW	до 27 dBm/ 500 mW
Communication range between network nodes	up to 100 m	up to 100 m	up to 10 km	up to 10 km
Transmission speed	100 Kbps	250 Kbps	up to 19.2 Kbps	250 Kbps; ● 1 Mbps; 2 Mbps
Transmission delay	Tx: 1% Rx: 99%	< 5 ms	1 ms to tens of seconds	● < 1 ms
Number of channels	16	16	127	127
Mobility of nodes	low	low	low	● high
Difficulty of installation	average	average	high	● low
Object orientation	devices and sensors	devices and sensors	devices and sensors	● humans, devices and sensors
Text messaging using Bluetooth	no	no	no	● есть, 150 байт/транзакция
Wireless user interfaces	no	no	no	● Bluetooth/BLE
GPS Navigation	no	no	no	● there is, GPS/GLONASS/Galileo/Beidou
Drone control	unsuitable	unsuitable	unsuitable	● suitable

Note: ● – network advantage Easy Net Everywhere.

Source: developed by the authors sourced [3-6], [7-8], [11-13],[16]

The problem is the lack of publicly available data on the technical characteristics of this network.

Task statement. In order to publish information about the characteristics of the Easy Net Everywhere network, the following characteristics of the network nodes should be investigated:

- total transmission time of a datagram with receipt acknowledgement;
- total transmission time of a datagram without receipt acknowledgement;
- time during which the radio channel is busy during datagram transmission;
- current consumption of the network node in the data reception mode;
- current consumption of the network node in data transmission mode;
- current consumption of the network node in deep sleep mode.

The research results presentation. The study of Easy Net Everywhere wireless network characterization was carried out using the following transceivers:

NRF24L01+, NRF24L01+PA+LNA (Fig. 1);

transceivers E01-ML01DP5, E01-2G4M27D (Fig. 2).



Figure 1 - NRF24L01+ and NRF24L01+PA+LNA transceivers

Source: <https://www.joom.com>

The NRF24L01+ (LoRa) transceiver has a power of 0 dBm, which enables stable communication between network nodes up to 350 meters away in the Easy Net Everywhere network (declared value: 100 m).

The NRF24L01+PA+LNA (LoRa) transceiver has a power of 20 dBm, which enables stable communication between network nodes up to 6000 meters away in the Easy Net Everywhere network (declared value: 1000 m).



Figure 2 - Transceivers E01-ML01DP5 and E01-2G4M27D

Source: <https://www.cdebyte.com>

The E01-ML01DP5 transceiver has a power of 20 dBm, which enables stable communication between network nodes up to 5000 meters away in the Easy Net Everywhere network (declared value: 2100 m).

NRF24L01+PA+LNA transceiver has a power of 27 dBm, which can establish stable communication between network nodes at a distance of up to 10000 meters in the Easy Net Everywhere network (declared value: 5000 m).

The tests were conducted with an SMA antenna, which has a gain of 3 dBi (Fig. 3).



Figure 3 - Transceiver antenna

Source: <https://www.manfrottospares.com>

In the Easy Net Everywhere network, datagrams are transmitted in two modes:
 datagram with receipt acknowledgement;
 datagram without receipt acknowledgement.

In the with receipt acknowledgement mode, delivery of the datagram to the receiving node is guaranteed (Fig. 4a). This mode is used in network applications where data loss is unacceptable.

In the case when the node-transmitter cannot receive an acknowledgement for the transmitted datagram (Fig. 4b), several more attempts are made to retransmit the datagram.

Mode without acknowledgement of reception does not guarantee lossless data delivery. The mode is used in network applications in which data is transmitted in a continuous stream.

This mode is useful for transmitting large amounts of data, such as surveillance camera images, drone control, etc.

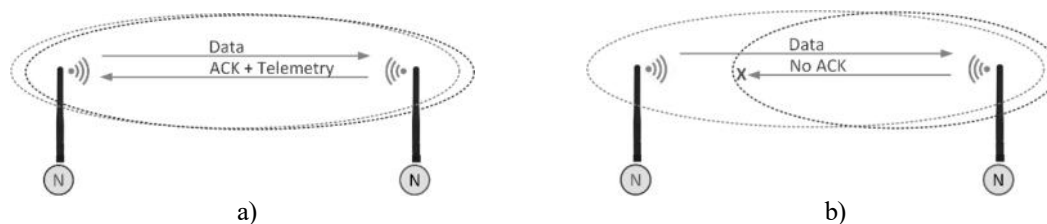


Figure 4 - Datagram transmission modes

Source: developed by the authors

A measurement scheme (Fig. 5) was used to investigate the performance of the Easy Net Everywhere wireless network. The datagram with a specified period is received by the node-transmitter using the UART interface. The transmitter node transmits the datagram to the receiver node.

The received datagram is shown on the terminal display. The UART:Tx, UART:Rx and RF:Transmit signals are fed to a logic analyzer, which is used to measure the timing characteristics.

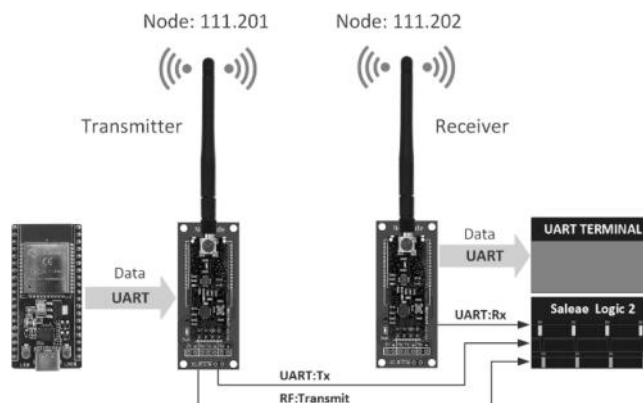


Figure 5 - Measuring Easy Net Everywhere wireless network characteristics

Source: developed by the authors

The structure of the Easy Net Everywhere network datagram is shown in Fig. 6.

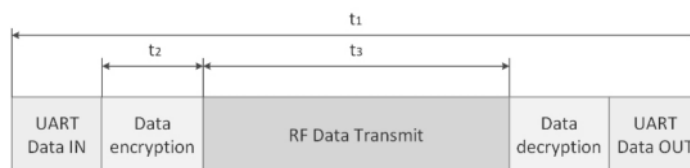


Figure 6 - Easy Net Everywhere network datagram structure

Source: developed by the authors

where:

t_1 – total transaction time;

t_2 – data encryption time;

t_3 – radio transmission time.

The authors have measured time characteristics in the mode with receipt acknowledgement. The dependence of temporal characteristics on bitrate and datagram length was obtained. The measurement results are presented in Table 2.

Table 2 - Mode with acknowledgement of datagram receipt. Dependence of time characteristics on bitrate and datagram length

RF bitrate	30 bytes			60 bytes			120 bytes			150 bytes		
	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms
9,1	10,2	0,8	7,2	13,8	0,8	11,5	24,1	0,8	19,5	28	0,9	23,6
1 Mbps	7,0	0,8	5,3	10,5	0,8	7,9	17,8	0,8	13,0	21,0	0,9	15,7
2 Mbps	6,4	0,8	4,8	9,7	0,8	7,4	16,5	0,8	12,1	19,8	0,9	14,7

Source: developed by the authors

The authors have measured the time characteristics in the mode without receipt acknowledgement. The dependence of temporal characteristics on bitrate and datagram length was obtained. The measurement results are presented in Table 3.

Table 3 – Mode without acknowledgement of datagram receipt. Dependence of time characteristics on bitrate and datagram length

RF bitrate	30 bytes			60 bytes			120 bytes			150 bytes		
	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms	t ₁ ms	t ₂ ms	t ₃ ms
250 Kbps	5,6	0,8	4,2	8,8	0,8	6,9	15,5	0,8	11,2	18,3	0,9	13,4
1 Mbps	4,2	0,8	2,9	6,5	0,8	4,3	11,4	0,8	7,0	13,5	0,9	8,5
2 Mbps	3,9	0,8	2,6	6,0	0,8	3,9	10,5	0,8	6,1	12,2	0,9	7,4

Source: developed by the authors

The results of the Easy Net Everywhere network data rate measurement are presented in Table 4.

Table 4 - Actual data transmission speed in Easy Net Everywhere network

UART, baud	Datagram length	RF bitrate	Period of datagram transmission	Transmission speed
921600	150 bytes	250 Kbps	15 ms	10 kB/s
921600	150 bytes	1 Mbps	10 ms	15 kB /s
921600	150 bytes	2 Mbps	10 ms	15 kB /s

Source: developed by the authors

The authors also measured the current consumption of the transmitter node. Measurement conditions:

Transceivers: NRF24L01+; NRF24L01+PA+LNA; E01-ML01DP5; E01-2G4M27D.

Bitrate: 250 Kbps; 1 Mbps; 2 Mbps. Datagram length: 150 bytes. Modes: without receipt acknowledgement (AT+ASK-). Period of datagram transmission T = 20 ms; with receipt acknowledgement (AT+ASK+). Period of datagram transmission T = 30 ms, 100 ms; bluetooth (AT+BLE-): switched off. The measurement results are presented in Table 5.

Table 5 - Transmitter node current consumption

Transceiver	T = 20 ms /ACK- / I, mA			T = 30 ms /ACK+ / I, mA			T = 100 ms/ACK+/ I, mA		
	250 Kbps	1 Mbps	2 Mbps	250 Kbps	1 Mbps	2 Mbps	250 Kbps	1 Mbps	2 Mbps
NRF24L01+	45	40	42	43	43	43	44	44	44
NRF24L01+PA+LNA	108	62	56	76	59	52	69	56	55
E01-ML01DP5	93	55	49	63	50	47	60	48	47
E01-2G4M27D	365	112	84	170	83	70	120	72	61

Source: developed by the authors

Conditions for measuring the current consumption of a network node in deep sleep mode: Transceivers: NRF24L01+; NRF24L01+PA+LNA; E01-ML01DP5; E01-2G4M27D.

Measurements: current consumption in idle mode (transceiver is switched on); current consumption in deep sleep mode (transceiver is switched off); current consumption in deep sleep mode (transceiver in receive mode).

The measurement results are presented in Table 6.

Table 6 - Transceiver idle and deep sleep current consumption

Transceiver	Standby Mode, I mA	Deep sleep mode, I uA/mA	
		Transceiver OFF	Transceiver ON (reception mode)
NRF24L01+	43	1 uA	15 mA
NRF24L01+PA+LNA	52	2 uA	23 mA
E01-ML01DP5	44	2 uA	15 mA
E01-2G4M27D	52	9.7 mA	22 mA

Source: developed by the authors

The time when the transmitter node enters the deep sleep mode. It was measured from the moment of sending the AT command "AT+Sleep.Tx" to the moment when a logical "1" appears on the GPIO_NUM_33 pin of the controller.

Time for the transmitter node to come out of deep sleep mode. It was measured from the moment the "#" character was sent to the node to the moment the logical "0" appeared on the GPIO_NUM_33 pin of the controller.

Time for the receiver node to enter deep sleep mode. It was measured from the moment of sending AT-command "AT+Sleep.Rx" to the moment of appearance of logical "1" on the GPIO_NUM_33 pin of the controller.

Time for the receiver node to come out of deep sleep mode. It was measured from the moment the "#" symbol was sent to the transmitter node to the moment the "@ Ready" message appeared on the UART output of the receiver node.

Time of nodes readiness for data exchange when leaving the deep sleep mode. It was measured from the moment the "#" character was sent to the transmitter node to the moment the "@ 202 Ready " message appeared on the UART output of the transmitter node.

The measurement results are presented in Table 7.

Table 7 - Time of nodes entering and leaving the deep sleep mode

Measured parameter	Transmitter node	Receiver node
Entering deep sleep mode	1,6 ms	1,6 ms
Exiting deep sleep mode	88 ms	90 ms
Readiness to data exchange	200 ms	

Source: developed by the authors

Conclusions. The study results of the Easy Net Everywhere wireless network nodes technical characteristics showed that the Easy Net Everywhere network has high technical characteristics. The specification values depend on the transceiver used, datagram length, bitrate, operating mode and datagram transmission period. All transceivers have the same quiescent current consumption characteristics. In transmit mode, the current consumption increases. In deep sleep mode, all transceivers except the E01-2G4M27D transceiver consume current up to 2 uA, so these transceivers can be recommended for use in battery-powered stand-alone devices. The E01-2G4M27D transceiver consumes 9.7 mA in deep sleep mode, so its use is not rational in battery-powered devices. A good choice of transceiver for Easy Net Everywhere nodes is the NRF24L01+PA+LNA. The optimum bitrate for transceiver

operation is 1 Mbps. The resulting wireless network specifications of the Easy Net Everywhere network are incomplete. There is no data available on the maximum distance of stable communication between network nodes. Therefore, the goal of further research is a series of tests that will obtain data on the maximum communication distance of nodes in the network.

List of references

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. *Buffalo Technology*. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (reference date : 16.04.2025).
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (reference date : 12.01.2025).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee*. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (reference date : 12.01.2025).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee*. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (reference date : 16.04.2025).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee*. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (reference date : 12.01.2025).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment : *Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques*. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (reference date : 12.01.2025).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. *Vesternet Ltd*. 28.01.2020. URL: www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices (reference date : 16.04.2025).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (reference date : 16.04.2025).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (reference date : 16.04.2025).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16 : *Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (reference date : 16.04.2025).
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), *V1.0*, 2015 January.
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band.
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, *Datasheet, 2015 Semtech Corporation*.
14. Смірнов В.В., Смірнова Н.В., Пархоменко Ю.М. Бездротова локальна мережа класу Smart Home на базі модулів сплітерів-репітерів. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. Вип. 51. С. 195-202 (Фахове видання). DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.195-202>.
15. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Мобільна mesh-мережа для управління роєм об'єктів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.ІІ. С. 3-11 (Фахове видання). DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.3-11).
16. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Практична реалізація безпроводної мережі «Easy Net Everywhere». *M 58 International security studios : managerial, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Volume I*. NMBU, Research and Education. 2024. - 700 p. Oslo, Kingdom of Norway - 2024. С.665 - 697. DOI 10.5281/zenodo.10822120

References

1. Brian Verenkoff. (July 2011). Understanding and Optimizing 802.11n. *Buffalo Technology : website. lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf.
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : *website.wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6>.
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee : website.standards.ieee.org*. Retrieved from standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html.
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for InformAtion technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee : website.standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html.
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee*. Retrieved from standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html.

6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment : *Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques* (Jan. 2020). Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf>.
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. vesternet.com. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices>.
8. Recommendation G.9959 (n.d.). Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en>.
9. WiMAX Forum (n.d.) : website. wimaxforum.org. Retrieved from <http://wimaxforum.org>.
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16 : *Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (reference date : 16.04.2025).
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band.
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. *Datasheet, 2015 Semtech Corporation*.
14. Smirnov V.V., Smirnova N.V., Parkhomenko YU.M. Bezdrotova lokal'na mreza klasu Smart Home na bazi moduliv spliteriv-repiteriv. *Zahal'noderzhavnyy mizhvidomchyy naukovy-tekhnichnyy zbirnyk Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kykh mashyn*. Kropyvnyts'kyi: TSNTU, 2021. Vyp. 51. S. 195-202 (Fakhove vydannya). DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.195-202>.
15. Smirnov V.V., Smirnova N.V. Mobil'na mesh-mreza dlya upravlinnya roiem ob'ektiv. *Tsentral'noukrayins'kyi naukovy visnyk. Tekhnichni nauky*. 2023. Vyp. 7(38), ch.II. S. 3-11 (Fakhove vydannya). DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.3-11).
16. Smirnov V.V., Smirnova N.V. Praktychna realizatsiya bezprovidnoyi mrezy «Easy Net Everywhere». *M 58 International security studios: managerial, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Volume I*. NMBU, Research and Education. 2024. - 700 p. Oslo, Kingdom of Norway - 2024. S.665 - 697. DOI 10.5281/zenodo.10822120.

В. В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н. В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Дослідження технічних характеристик бездротової мережі Easy Net Everywhere

Метою статті є публікація результатів дослідження технічних характеристик вузлів бездротової мережі Easy Net Everywhere з використанням недорогих і доступних трансиверів діапазону 2.4 GHz. Для розв'язання задач з управління віддаленими та розподіленими в просторі об'єктами авторами в рамках науково-дослідної теми «Створення мобільної мережі 2.4 GHz з адаптивною аморфною топологією для управління роєм БПЛА і робототехнічних об'єктів», реєстраційний № 0120U104088 було створено бездротову мережу Easy Net Everywhere.

Авторами було проведено дослідження технічних характеристик створеної мережі та порівняння їх із характеристиками відомих бездротових мереж. Представлено результати дослідження технічних характеристик вузлів бездротової мережі Easy Net Everywhere спільно з трансиверами NRF24L01+, NRF24L01+PA+LNA, E01-ML01DP5 і E01-2G4M27D. Дослідження технічних характеристик здійснювалося за допомогою вузла-передавача, вузла-приймача, UART-терміналу, вимірювальних приладів та логічного аналізатора. Було досліджено часові характеристики мережі в різних режимах роботи. Було виміряно споживання струму вузлами мережі в режимі передавання даних і в режимі глибокого сну. Було виміряно час входу вузла в режим глибокого сну і час виходу з нього. Результати вимірювання технічних характеристик вузлів бездротової мережі показали, що мережа Easy Net Everywhere має технічні характеристики, які дають змогу вирішувати широке коло завдань. Наведено рекомендації щодо вибору бітрейта для роботи вузлів у мережі та рекомендації щодо вибору трансиверів для автономних пристроїв, які використовують живлення від батарей.

Уперше було досліджено технічні характеристики бездротової мережі Easy Net Everywhere. Результати дослідження показали значну перевагу характеристик досліджуваної мережі над мережами, розглянутими у статті. Цінність дослідження полягає в тому, що розробники та конструктори пристроїв і систем спеціального призначення отримують інформацію про можливості досліджуваної мережі. Однак, отримані технічні характеристики вузлів бездротової мережі мережі Easy Net Everywhere є неповними без даних про максимальну дистанцію стабільного зв'язку між вузлами мережі. Тому метою подальших досліджень є отримання даних про максимальну дистанцію взаємодії вузлів мережі.

бітрейт, дейтаграма, бездротова мережа, easy net everywhere, мережевий вузол, характеристика мережі

Одержано (Received) 08.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.138.23:624.012.25 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.350-357](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.350-357)

С. В. Біда, доц., канд. техн. наук, О. В. Петраш, доц., канд. техн. наук,

Р. В. Петраш, доц., канд. техн. наук

*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: serhii.bida@pdau.edu.ua*

Ефективність армування ґрунтоцементних елементів, влаштованих за бурозмішувальною технологією

Проаналізовано досвід підсилення основ фундаментів будівель і споруд шляхом утворення ґрунтоцементних елементів різними способами. Акцентовано увагу на перевагах таких елементів, влаштованих за бурозмішувальною технологією. Недоліком ґрунтоцементних елементів є їх відносно низька міцність за матеріалом. Підвищення несучої здатності можливе за рахунок їх армування, однак занурення каркасу у ґрунтоцемент є проблематичним. Запропоновано спосіб, що дозволяє збільшити глибину армування ґрунтоцементних елементів.

підсилення основ, ґрунтоцемент, бурозмішувальна технологія, армування

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток будівництва з одного боку дозволяє зводити більш високі будівлі і споруди, змінювати конструктивні схеми будівель для більш ефективного використання внутрішнього простору, будувати на територіях, що раніше вважались малопридатними для сучасних будівель. Збереження земель сільськогосподарського призначення спонукає до використання для будівництва територій, розміщених на схилах, на підроблюваних територіях, складених насипними, намівними, слабкими, засоленими, просадочними ґрунтами та ґрунтами з іншими особливими властивостями. Підвищення навантажень на основу, яка має недостатню міцність, вимагає від будівельників застосовувати фундаменти, здатні витримати ці навантаження, або ж вжити заходів для підвищення несучої здатності основи. Використання фундаментів, що передають навантаження на глибоко розміщені шари ґрунту значно збільшує вартість і терміни будівництва, використання спеціальної техніки та часто вимагає виконання робіт з улаштування фундаментів спеціалістами високої кваліфікації. Тому останнім часом значна увага приділяється розвитку технологій підсилення ґрунтів основи, що дозволяє в кінцевому результаті використати фундаменти неглибокого закладання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно класифікації, розробленій М.Л. Зоценком [1] підсилення основ може бути виконане різними способами – як з вийманням ґрунту (влаштування ґрунтових чи піщаних подушок), так і без нього (ущільнення трамбівками чи з використанням ґрунтових паль, термічною чи електрохімічною обробкою ґрунту та нагнітанням у ґрунт в'язучих речовин). Особливу увагу при підсиленні основ приділяють останнім способом, так як вони не пов'язані з вийманням ґрунту і дозволяють виконати роботи у стиснуті строки.

Підсилення ґрунтів шляхом нагнітання у ґрунт в'язучої речовини пов'язане з використанням обладнання, здатного створити необхідний тиск для проникнення в'язучого у ґрунт або ж для руйнування структури ґрунту і перемішування його з в'язучим [2-6]. Так, якщо для звичайної цементації необхідне обладнання, здатне

створювати тиск до 0,4 МПа, то нагнітання цементно-силікатних, піщано-цементно-силікатних розчинів та особливих композитних розчинів ін'єктуванням виконують під тиском до 0,8 МПа, а струменева цементация (JET GROUTING), за якою відбувається одночасне руйнування і перемішування ґрунту з цементним розчином у режимі тіх-іп-пласе (перемішування на місці), потребує використання енергії високонапірного струменя (35-70 МПа). Отримані різними способами ґрунтоцементні елементи широко використовуються у будівництві для підсилення слабких основ, влаштування утримуючих, огорожуючих, гідроізоляційних чи відокремлюючих споруд при зведенні підземних частин чи фундаментів будівель і споруд [7, 8].

Звичайно, такі технології дозволяють влаштувати окремі масиви (палі) підсиленого ґрунту значних розмірів, однак виникає питання щодо контролю постійності перерізу утворених елементів у ґрунтових масивах, особливо у тих, що характеризуються неоднорідністю складу, наявністю включень чи послаблених зон. Цих недоліків можна уникнути, використовуючи інший метод подання в'язучого у ґрунтовий масив – створення ґрунтоцементних елементів за бурозмішувальною технологією.

Бурозмішувальна технологія вже тривалий час широко застосовується для підсилення основ, складених слабкими ґрунтами шляхом підвищення фізико-механічних властивостей цих ґрунтів [9, 10]. Суть технології заключається в розпушуванні ґрунту безпосередньо у свердловині за допомогою спеціальної бурової насадки без виймання його на поверхню і ретельному перемішуванні його з водоцементною суспензією. Водоцементна суспензія (цементний розчин різної консистенції залежно від характеристик ґрунтів) подається до свердловини розчинонасосом під тиском 0,2 – 0,5 МПа. Після твердіння ґрунтоцементної суміші утворюється каменеподібний матеріал, який не розмокає у водонасичених умовах, має густину 1,8 – 1,9 т/м³, міцність 2–3,5 МПа.

Спосіб влаштування ґрунтоцементних паль (ґрунтоцементних елементів) за бурозмішувальною технологією має ряд переваг перед іншими способами:

- висока мобільність комплексу обладнання, необхідного для виготовлення ґрунтоцементних елементів;
- низький рівень динамічної дії на ґрунтову основу, що робить можливим використання такої технології на схилах, при влаштуванні утримуючих протизсувних споруд;
- легке варіювання параметрів ґрунтоцементних елементів шляхом зміни діаметру робочого обладнання чи глибини елементів;
- можливість використання методу підсилення ґрунтів у обмеженому просторі, що дає можливість підсилювати основу існуючих будівель і споруд, наприклад при піднятті рівня ґрунтових вод;
- низький рівень шуму та вібрації, що надає переваг методу з точки зору охорони праці;
- відсутність залежності технологічного процесу від постачання сумішей чи матеріалів;
- можливість влаштування майданчика для підготовки суміші в'язучого за межами робочого простору, або ж використання суміші в'язучого, підготовленої у заводських умовах;
- можливість виконання підсилення ґрунтів з різноманітними особливими властивостями, включаючи обводнені ґрунти;
- відсутність впливу погодних факторів на технологічний процес;
- заощадливе використання цементного розчину;

- контроль за витратами цементного розчину, що дозволяє отримати однорідність ґрунтоцементного елемента по всій довжині;
- контроль за витіканням пульпи на поверхню землі, та відсутність проблеми її утилізації;
- використання широкодоступного обладнання для влаштування ґрунтоцементного елемента, що не потребує наявності фахівців високої кваліфікації;
- міцність отриманих ґрунтоцементних елементів, отриманих за інших рівних умов, порівняна з міцністю елементів, отриманих за технологією jet grouting;
- відсутність необхідності використання глинистих розчинів чи обсадних труб для збереження постійного перерізу елементів, оскільки рідкий ґрунтоцемент спроможний самостійно утримувати стійке положення стінок свердловини;
- відсутність використання привізних ґрунтів для влаштування ґрунтоцементних елементів;
- можливість легкого регулювання ступеня підсилення ґрунтової основи шляхом зміни розмірів сітки влаштування ґрунтоцементних елементів;
- можливість влаштування суцільних стінок із ґрунтоцементу для створення водонепроникних завіс та розділюючих стінок між близько розміщеними будівлями.

Постановка завдання. Необхідно відзначити, що суттєвим недоліком ґрунтоцементних елементів у порівнянні з бетонними є їх відносно низька міцність за матеріалом. Перевагою бетонних елементів є можливість їх армування металевими каркасами як при виготовленні у збірному варіанті, так і при бетонуванні влаштованих порожнин. Армування ґрунтоцементних елементів є технологічно більш складним процесом, оскільки їх влаштування ведеться без виймання ґрунту. Тому метою даної роботи є пошук способів виконання ефективного армування ґрунтоцементних елементів під час їх влаштування. Для досягнення мети необхідно виконати такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи армування ґрунтоцементних елементів та виявити їх недоліки;
- вибрати найбільш ефективний спосіб армування ґрунтоцементних елементів;
- вдосконалити спосіб армування з урахуванням можливості використання того ж обладнання, яким влаштовуються ґрунтоцементні елементи.

Вирішення задачі підвищення міцності ґрунтоцементних елементів дозволить значно розширити область їх використання та застосовувати їх з більшою ефективністю.

Виклад основного матеріалу. Для збільшення міцності ґрунтоцементу вдавались до багатьох способів. Так, окрім цементу у ґрунт додавали золу виносу [11-14], пластифікуючі добавки [15], піддавали ґрунтоцемент впливу вібрації [16], виконували армування синтетичними матеріалами [17]. Підвищити міцність ґрунтоцементних елементів можливо також за рахунок збільшення кількості цементу, однак такий шлях має свою межу, адже будь-який ґрунт у природному стані має свій показник пористості, а враховуючи, що при виготовленні ґрунтоцементних елементів за бурозмішувальною технологією у ґрунт подається цементне молоко, повне заповнення пор неможливе. Ще більш актуальним цей фактор стає при підсиленні насичених водою ґрунтів, адже в такому випадку пори ґрунту майже повністю заповнені водою.

Тому найбільш прийнятним способом підвищення міцності ґрунтоцементних елементів є їх армування металевими елементами.

Раніше була доведена можливість армування ґрунтоцементу, оскільки виконується основна передумова сумісної роботи цього матеріалу з арматурою – близькість значень коефіцієнта теплового лінійного розширення обох матеріалів.

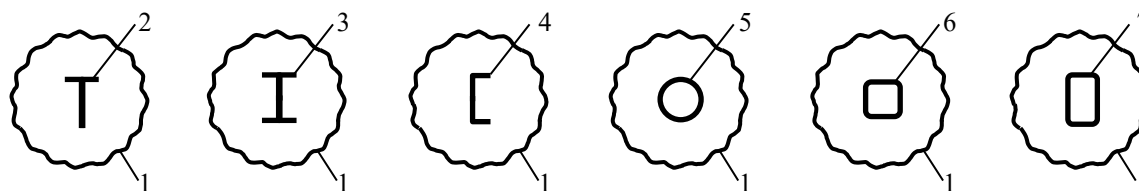
Питання корозійної стійкості арматури розглядалось у роботах [18, 19] з метою довести, що ґрунтоцемент створює достатній захист каркасу від впливу вологи, особливо враховуючи що виготовлення та експлуатація ґрунтоцементних елементів передбачається у обводнених ґрунтах, а в деяких випадках ґрунтові води можуть створювати агресивне середовище.

Водонепроникні властивості ґрунтоцементу вивчались в лабораторних умовах шляхом виготовлення зразків із суміші лесових суглинків (оскільки саме такі ґрунти при обводненні переходять у категорію слабких ґрунтів) з портландцементом марки М400. Вміст портландцементу становив 20 % від ваги сухого ґрунту, водоцементне відношення розчину – $V/C = 1$. Після виготовлення зразки зберігалися у вологих умовах протягом 28 діб. Випробування проводились стандартним методом «микрої плями». Водонепроникність серії зразків оцінювалась максимальним тиском води, за якого на чотирьох із шести зразків не спостерігалось просочування води. У результаті було визначено, що ґрунтоцемент відповідає марці за водонепроникністю W14.

Паралельно проводились випробування зразків ґрунтоцементу на водонепроникність експрес-методом з використанням пристрою ВВ-2. Результати випробувань також підтвердили, що водонепроникність ґрунтоцементу відповідає марці W14.

Таким чином на основі проведених випробувань визначено, що близькість коефіцієнтів теплового розширення ґрунтоцементу та арматури, низька проникність та однорідність ґрунтоцементу дає можливість проводити армування ґрунтоцементних елементів.

З огляду на те, що армування ґрунтоцементних елементів каркасом на значну глибину проблематично, навіть майже відразу після їх виготовлення, використовуються способи армування таких конструкцій з використанням прокатних профілів (тавр, двотавр, швелер, труби круглого, квадратного чи прямокутного перерізу тощо), які розміщуються по центру поперечного перерізу.



(1 – ґрунтоцементний елемент; 2 – 7 – прокатні профілі) (тавр, двотавр, швелер, труба круглого перерізу, труба квадратного перерізу, труба прямокутного перерізу відповідно)

Рисунок 1 – Схеми армування ґрунтоцементних елементів прокатними профілями
Джерело: розроблено авторами

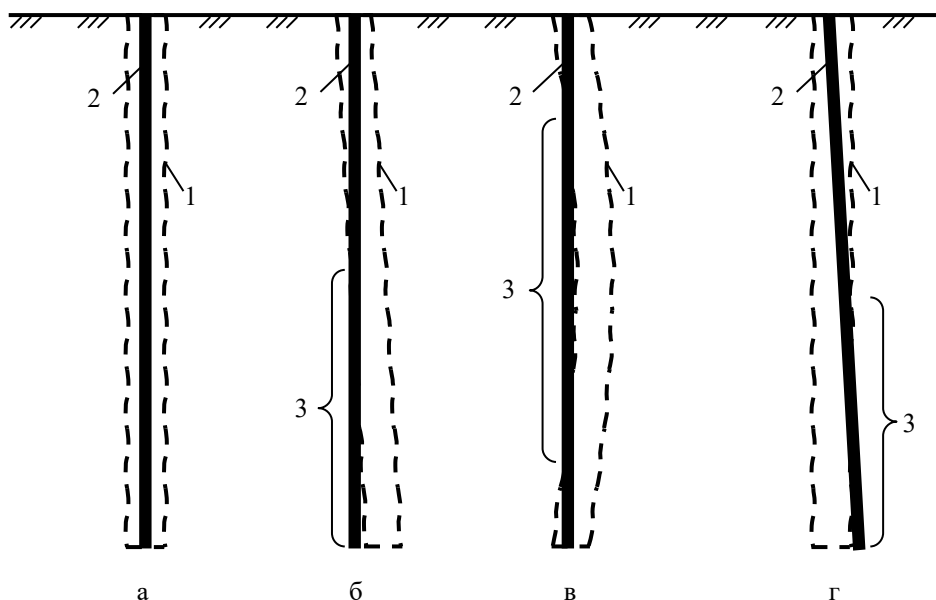
На перший погляд такий метод має переваги з точки зору полегшення занурення за рахунок значної жорсткості армуючого елемента, створення сприятливих умов для набору міцності ґрунтоцементної суміші, розміщеної в середині замкнутих профілів, збільшення площі контакту армуючого елемента з ґрунтоцементом, що покращує умови їх сумісної роботи.

Однак досвід влаштування ґрунтоцементних елементів показує, що тіло ґрунтоцементного елемента може мати не вертикальне положення, а похиле, а іноді і вигнуте по довжині. У такому випадку при армуванні тіла ґрунтоцементного елемента жорсткими профілями фіксується вихід профіля за межі тіла ґрунтоцементного елемента, що робить неможливою їх сумісну роботу. Такий же ефект можна

спостерігати при найменшому відхиленні жорсткого профілю від вертикального положення.

З іншого боку концентрація арматури призводить, у свою чергу, до нерівномірного розподілу напружень по площі поперечного перерізу елемента та їх концентрації біля армуючого елемента, що може призвести до його «продавлювання» через ґрунтоцементний елемент. Та і відомо, що армовані елементи працюють значно краще при розосередженні арматури по поперечному перерізу.

Тому дослідження проводились за умови армування ґрунтоцементних елементів арматурними каркасами. Виявилось, що занурення арматурних каркасів у ґрунтоцемент можливе лише на обмежену глибину, адже наявність поперечної арматури (кількість якої збільшується з глибиною занурення каркасу) потребує значного зусилля вдавлення, що, в свою чергу, призводить до втрати стійкості каркасу, його деформації та втрати проектного положення. Використання вібрації для полегшення занурення каркасу призводить до більшого ущільнення ґрунтоцементної суміші і, як наслідок, погіршення умов занурення каркасу. Тому використання армування верхньої частини ґрунтоцементних елементів можливе, наприклад, за необхідності забезпечення їх жорсткого закріплення з ростверком чи фундаментною плитою.



а – співвісне положення ґрунтоцементного елемента і армуючого профілю; б – нахил ґрунтоцементного елемента; в – вигин ґрунтоцементного елемента; г – нахил армуючого елемента
(1 – ґрунтоцементний елемент; 2 – прокатний профіль; 3 – зона виходу профіля за межі тіла ґрунтоцементного елемента)

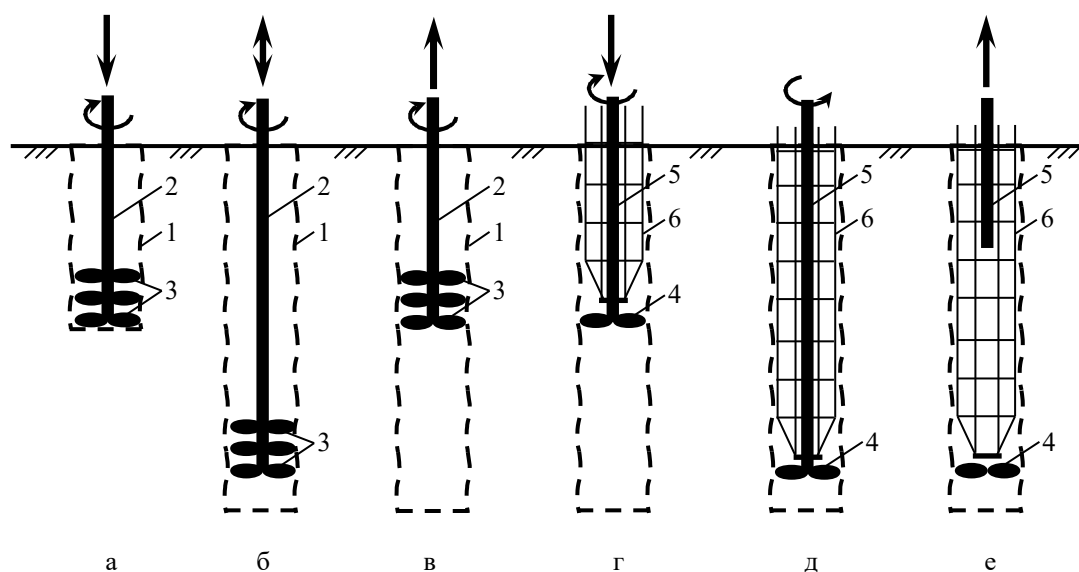
Рисунок 2 – Вихід профіля за межі тіла ґрунтоцементного елемента

Джерело: розроблено авторами

Армування ґрунтоцементного елемента окремими стрижнями потребує менше затрат, однак не гарантує проектного положення стрижня по всій довжині елемента, включаючи його можливий вихід за межі ґрунтоцементу, що з одного боку не дозволить елементу мати необхідну несучу здатність, а з іншого – неминуче призведе до корозії арматури яка не захищена ґрунтоцементом.

Виникає питання розробки технології армування ґрунтоцементних елементів, яка б дозволила значно збільшити глибину занурення каркасу.

Суть такої технології полягає у використанні ефекту «розрідженого» стану ґрунтоцементу в якому він перебуває під час перемішування суміші. Перед зануренням каркасу його необхідно приєднати до зовнішньої пустотілої циліндричної штанги, всередині якої розміщена внутрішня штанга зі знімними ножами на вістрі. Під час занурення ножі, обертаючись за допомогою внутрішньої штанги, розпушують ґрунт і підтримують його у пластичному стані. Обидві штанги опускаються одночасно, разом із зовнішньою штангою проводиться занурення каркасу. Кріплення до штанги дозволяє зберігати каркасу проектне положення. Після досягнення проектної глибини штанги підіймаються, від'єднуючись від каркасу та залишаючи знімний ніж під каркасом. Для забезпечення цілісності ґрунтоцементного елемента підняття штанг відбувається паралельно з вібруванням, що дозволить уникнути утворення порожнин у тілі елемента. Глибина армування елемента каркасом з використанням такого методу буде значно більшою ніж при армуванні способом вдавлювання каркасу.



а-в – вшестування ґрунтоцементного елемента; г – занурення арматурного каркасу;

д – від'єднання знімних ножів ; е – підйом штанг

(1 – ґрунтоцементний елемент; 2 – пустотіла штанга для подачі цементного розчину; 3 – насадка для розпушування ґрунту; 4 – знімний ніж на внутрішній штанзі; 5 – зовнішня штанга; 6 – каркас)

Рисунок 3 – Схема вшестування армованого ґрунтоцементного елемента

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Існуючі методи не завжди дозволяють провести надійне армування ґрунтоцементних елементів. Так, армування прокатними профілями, з одного боку, не може забезпечити надійність проектного положення профіля у ґрунтоцементному елементі, з іншого боку призводить до нерівномірного розподілу напружень по перерізу елемента, концентрації арматури.

Армування елементів каркасом значно ефективніше, оскільки таким способом забезпечують більш рівномірний розподіл напружень по перерізу і значно зменшують витрати металу, однак існуючими методами занурити каркас на потрібну глибину неможливо.

Застосування розробленої методики армування ґрунтоцементних елементів дозволить виконувати їх армування просторовим каркасом на значну глибину, що, у свою чергу, значно розширить сферу їх застосування при підсиленні основ, складених слабкими ґрунтами.

Список літератури

1. Зоценко М. Л. та ін. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник для студентів вищих навчальних закладів / за ред. М. Л. Зоценка*. Полтава : ПНТУ, 2004. 562 с.
2. Shibazaki M. State of practice of jet grouting. *Geotechnical Special Publication. Grouting and Ground Treatment*. 2003. Vol. 1. P. 198–217. DOI: [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)7](https://doi.org/10.1061/40663(2003)7).
3. Njock P. G. A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y. H. A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11, № 20. P. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>.
4. Tornaghi R., Pettinaroli A. Design control criteria of jet grouting treatment. *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place* (Paris, France). 2004.
5. Croce P., Flora A., Modoni G. *Jet grouting: technology, design and control*. New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 305 с.
6. Зуєвська Н. В., Шайдецька Л. В., Губашова В. Є. Перспективи застосування струменево-цементацийного закріплення ґрунтових основ. *Геоінженерія*. 2020. № 3. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.3.2020.219322>.
7. Зоценко М. Л. Ґрунтоцемент – конструктивний і гідроізоляційний матеріал при будівництві підземних споруд. *Будівельні конструкції*. 2016. Вип. 83 (2). С. 296–316. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83\(2\)_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83(2)_37).
8. Кірічек Ю. А., Комісаров Г. В. Конструкції з ґрунтоцементу для зведення фундаментів будівель і споруд. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 3. С. 42–50. DOI: 10.30838/J.BBPSACEA.2312.040719.42.462.
9. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом : монографія*. Харків : Друкарня Мадрид, 2016. 94 с.
10. Zotsenko N., Vynnykov Yu., Zotsenko V. Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use*. Oradea : Oradea University Press, 2015. P. 192–253.
11. Блашук Н. В., Маєвська І. В., Гончарук М. С. Використання золи виносення у складі ґрунтоцементу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. 2020. № 2. С. 51–65. DOI: 10.31649/2311-1429-2020-2-51-65.
12. Михайловська О. В. Технологія влаштування ґрунтоцементних блоків з добавкою золи. *Вісник Львівського торгівельно-економічного університету. Технічні науки*. 2022. № 31. С. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-02>.
13. Zotsenko M., Mykhailovska O., Shirinzade I., Lartseva I. Influence of fly ash additives on strength characteristics of soil–cement as a material for waste storage construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. P. 457–464.
14. Маєвська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М. С. Визначення впливу добавок золи виносення на властивості ґрунтоцементу. *Інноваційні технології в будівництві : міжнар. наук.-техн. конф.* (Вінниця, 2018). Вінниця : ВНТУ, 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020>.
15. Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу. *Зб. наук. пр. (Галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34). С. 171–177.
16. Marchenko V., Nesterenko T. Influence of vibration time during preparation soil-cement piles on their bearing capacity. *Conference reports materials «Problems of energy saving and nature use 2013»*. Budapest, 2014. P. 78–83.
17. Novytskyi O. Soil-cement piles fiber reinforced. *Theory and Building Practice*. 2021. Vol. 3, № 1. P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.113>.
18. Bondar V., Bondar L., Petrash O. Reinforcement corrosion characteristics with periodical profile. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, № 3.2. P. 575–579.
19. Петраш Р. В., Петраш О. В., Кальченко Т. С. Технологічні особливості процесу армування ґрунтоцементних паль. *Проблеми сучасного будівництва : матеріали Всеукр. конф. молодих учених і аспірантів* (Полтава, 17 груд. 2014 р.). Полтава : ПолтНТУ, 2014. С. 263.

References

1. Blashchuk, N. V., Maievskaya, I. V., & Honcharuk, M. S. (2020). Use of fly ash in soil–cement composition. *Modern Technologies, Materials and Structures in Construction*, 2, 51–65. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65> [in Ukrainian].
2. Bondar, V., Bondar, L., & Petrash, O. (2018). Reinforcement corrosion characteristics with periodical profile. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 575–579.
3. Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet grouting: Technology, design and control*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
4. Kirichuk, Yu. A., & Komissarov, H. V. (2019). Structures made of soil–cement for construction of building foundations. *Bulletin of Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 3, 42–50. <https://doi.org/10.30838/J.BBPSACEA.2312.040719.42.462> [in Ukrainian].

5. Marchenko, V., & Nesterenko, T. (2014). Influence of vibration time during preparation soil–cement piles on their bearing capacity. In *Conference reports materials “Problems of energy saving and nature use 2013”* (p. 78–83). Budapest.
6. Maievska, I. V., Ocheretnyi, V. P., & Honcharuk, M. S. (2018). Determination of the influence of fly ash additives on the properties of soil–cement. In *Innovative technologies in construction: International scientific-technical conference* (Vinnitsia, Ukraine). Vinnitsia: VNTU. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020> [in Ukrainian].
7. Mykhailovska, O. V. (2022). Technology of arranging soil–cement blocks with fly ash additives. *Bulletin of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, 31, 14–18. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-02> [in Ukrainian].
8. Njock, P. G. A., Chen, J., Modoni, G., Arulrajah, A., & Kim, Y. H. (2018). A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), 1–31. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>
9. Novitskyi, O. P. (2012). Influence of plasticizing additives on soil–cement strength. *Collected Scientific Works (Industry Engineering, Construction)*, 4(34), 171–177 [in Ukrainian].
10. Novytskyi, O. (2021). Soil–cement piles fiber reinforced. *Theory and Building Practice*, 3(1), 113–119. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.113>
11. Petrash, R. V., Petrash, O. V., & Kalchenko, T. S. (2014, December 17). Technological features of the soil–cement pile reinforcement process. In *Problems of modern construction: Proceedings of the All-Ukrainian Conference of Young Scientists and Postgraduates* (p. 263). Poltava: PoltNTU [in Ukrainian].
12. Shibazaki, M. (2003). State of practice of jet grouting. *Geotechnical Special Publication. Grouting and Ground Treatment*, 1, 198–217. [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)7](https://doi.org/10.1061/40663(2003)7)
13. Tornaghi, R., & Pettinaroli, A. (2004). Design control criteria of jet grouting treatment. In *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place* (Paris, France).
14. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Bored soil–cement piles manufactured by boring–mixing method: Monograph*. Kharkiv: Drukarnia Madrid [in Ukrainian].
15. Zotsenko, M., Mykhailovska, O., Shirinzade, I., & Lartseva, I. (2022). Influence of fly ash additives on strength characteristics of soil–cement as a material for waste storage construction. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 457–464). Springer.
16. Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V. (2015). Soil–cement piles by boring–mixing technology. In *Energy, energy saving and rational nature use* (pp. 192–253). Oradea: Oradea University Press.
17. Zotsenko, M. L. (2016). Soil–cement as a structural and waterproofing material in underground construction. *Building Constructions*, 83(2), 296–316. [nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83\(2\)_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83(2)_37) [in Ukrainian].
18. Zotsenko, M. L. (Ed.). (2004). *Engineering geology. Soil mechanics, foundations and foundations: Textbook for students of higher educational institutions*. Poltava: PNTU [in Ukrainian].
19. Zuievskaya, N. V., Shaidetska, L. V., & Hubashova, V. Ye. (2020). Prospects for the use of jet–cement soil strengthening. *Geoengineering*, 3, 13–19. doi.org/10.20535/2707-2096.3.2020.219322 [in Ukrainian].

Serhii Bida, Assoc. Prof., PhD tech. sci, Oleksandr Petrash, Assoc. Prof., PhD tech. sci,

Ruslan Petrash, Assoc. Prof., PhD tech. sci

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Reinforcement Efficiency of Soil-Cement Elements Manufactured by Deep Soil Mixing Technology

The construction of buildings with significant loads on the foundation and the use of areas of loose soils for construction requires builders to take measures to increase the bearing capacity of the foundation. In recent years, considerable attention has been paid to the development of technologies for strengthening the foundation soils, which ultimately allows the use of shallow foundations. One of these areas is the arrangement of soil-cement elements using various technologies. The article focuses on increasing the bearing capacity of soil-cement elements manufactured using deep soilmixing technology.

The construction of soil-cement elements is possible using various technologies, but the deep soil mixing technology has a number of advantages, including high mobility of the equipment complex, the ability to work in constrained conditions, easy variation of soil-cement elements parameters by using replaceable equipment, minimal impact on the environment and workers in terms of occupational safety, independence of the technological process from external factors, the ability to constantly monitor material consumption This method of producing soil-cement elements by mixing without removing the soil makes it possible to perform work without using casing or other measures to ensure the stability of a borehole.

However, as foundation construction practice has shown, the main disadvantage of soil-cement elements is their relatively low material strength. Increasing the strength of soil-cement elements is possible in various ways - by adding more cement, plasticizing or other additives, fly ash, vibration, reinforcement with synthetic materials, etc. However, the most effective way to increase the bearing capacity is to reinforce them with rolled profiles or spatial frames. Reinforcement with frames is more effective, but immersion of the frame in soil cement is problematic, so the paper proposes a method of immersion of the frame that allows increasing the depth of reinforcement of soil cement elements.

ground improvement, soil-cement, deep soil mixing technology, reinforcement

Одержано (Received) 26.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 13.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 625.8+691

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.358-365](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.358-365)

А. С. Лапченко, ст. наук. співроб., канд. техн. наук
Національний транспортний університет, м. Київ, Україна
e-mail: las83@ukr.net

Порівняння властивостей дорожнього цементобетону з додаванням поліпропіленових та базальтових фібр

Мета і завдання дослідження полягає у встановленні впливу різних дозувань базальтової та поліпропіленової фібри в широкому діапазоні концентрацій на основні фізико-механічні показники дорожнього цементобетону на основі портландцементу з частковою його заміною молотим доменним шлаком та на основі тільки клінкерного портландцементу. У статті наведено результати впливу різних дозувань базальтових волокон та поліпропіленових фібр в широкому діапазоні концентрацій на фізико-механічні властивості дорожнього цементобетону. Встановлено, що введення поліпропіленових фібр та базальтових волокон майже не впливає на міцність при стиску цементобетону. На основі експериментальних досліджень визначено концентрацію поліпропіленових та базальтових фібр, яка відповідає максимуму міцності на розтяг при згині цементобетону. Така концентрація становить 0,9-1,0 кг/м³ поліпропіленової фібри і 15,0-16,0 кг/м³ базальтового волокна. Встановлено зміну значення середньої щільності цементобетонів з додаванням поліпропіленових фібр та базальтових волокон. Введення оптимальної кількості поліпропіленового волокна (фібри) призводить до більших значень параметру міцності на розтяг при згині дорожнього цементобетону у порівнянні з цементобетоном на основі базальтового волокна. Зміна міцнісних показників цементобетону на основі портландцементу частково заміненого молотим шлаком з додаванням оптимальної кількості поліпропіленових фібр та базальтових волокон схожа на зміну цих показників цементобетону на основі суто клінкерного портландцементу.

базальтові волокна, згин, концентрація, міцність, поліпропіленова фібра, стиск, цементобетон

Постановка проблеми. В переважній більшості дорожнє покриття влаштовується з асфальтобетону [1]. Однак зростаючі темпи підвищення інтенсивності руху автомобільного транспорту в усьому світі з одночасним підвищенням навантаженням на вісь автомобіля [1, 2], постійні зміни клімату з підвищенням середньої температури повітря впродовж останнього півстоліття [3, 4], підвищені вимоги до покриття змушують дорожників замінювати асфальтобетон на цементобетон. На даний час загальна протяжність цементобетонних доріг у світі може досягти 30 %, що є актуальним по мірі вичерпування нафти і її циклічної дорожнечі, як сировини для виготовлення бітумів. До того ж запаси нафти зосереджені не рівномірно у світі і є практично дефіцитним товаром у Європейській частині світу. Навідміну цемент, як складова цементобетону, може виготовлятися з місцевих родовищ крейди, вапняку, поклади яких більш рівномірно розташовані у всьому світі і відповідно не є дефіцитним матеріалом.

Однією з вагомих причин, що стримує більш широке впровадження цементобетонного матеріалу в якості покриття є його не достатня міцність на розтяг при згині. Вирішення цієї проблеми може полягати у застосуванні різних видів фібр.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З неметалевих волокон найбільш доступними за ціновими і якісними показниками можуть бути полімерні (органічні) і базальтові (неорганічні) волокна [5, 6].

Поліпропіленове волокно - це синтетичне волокно, отримане шляхом полімеризації пропілену, що забезпечує хорошу міцність, стабільність до хімічних речовин, відносно низьку вартість, і широке використання в цементних композитах [7].

Базальтове волокно є неорганічним матеріалом, який має високу цінність для використання в промисловості, інженерії, має стійкість до високих температур та може ефективно покращити механічні властивості цементного бетону, включно з характеристиками покриття [8].

За рахунок дисперсного армування в цементобетоні утворюється нова структура [6], яка в порівнянні з звичайними цементобетонами майже не змінює міцність при стиску [9-11] або підвищує понад 20 % даний показник для піщаного цементобетону [9], зазвичай має більш високий модуль пружності [12], вищу міцність на розтяг [5, 9, 13], тріщиностійкість [5, 14], морозостійкість та водостійкість [9, 11, 15], стійкість до стирання [16, 17], ударів [5] і атмосферного впливу [11], меншу усадку [18-23]. При встановленні зазначених властивостей було відмічено, що ефективність використання поліпропіленових і базальтових фібр залежить від їх розмірів і конфігурації. Застосування синтетичних волокон може сприяти прискоренню набору міцності на початковій стадії [24]. В наведених роботах отримані показники цементобетону з застосуванням металевих, полімерних (органічних) і базальтових (неорганічних) волокон (фібри) не завжди можна порівняти між собою, бо в певних роботах використовується лише один вид волокон, а в інших інший. Крім того, в роботах де порівнюють показники цементобетону з різними видами фібр співставлення іде за концентрацією фібри що рекомендована виробником або з інших міркувань і не має повного співставлення даних в широкому діапазоні концентрацій. В певних роботах наводиться широкий вид концентрацій для одного виду бетону, переважно піщаного, а для ін. видів бетону концентрація волокон (фібр) має вибіркового фрагментарний характер.

Постановка завдання полягає у встановленні впливу різних дозувань базальтової та поліпропіленової фібри в широкому діапазоні концентрацій на основні фізико-механічні показники дорожнього цементобетону. Також метою і завданням дослідження є порівняння властивостей дорожнього цементобетону з використанням базальтової та поліпропіленової фібри. Крім того ставиться завдання порівняння цементобетонів на основі портландцементу з частковою його заміною молотим доменним шлаком та на основі тільки клінкерного портландцементу з додаванням базальтових та поліпропіленових волокон (фібр) в широкому діапазоні концентрацій, що слугуватиме продовженням роботи [25].

Виклад основного матеріалу. У роботі використано портландцемент ПЦ І-500 та ПЦ ІІ/А-Ш 500 ПрАТ “Дікергофф Цемент Україна”. В якості заповнювачів використано щебінь гранітний фр. 5-10 і 10-20, а також пісок кварцовий з модулем крупності 1,4.

Фізико-механічні випробування цементів та бетонів проводили згідно з чинними стандартами. Міцнісні властивості цементобетонів оцінювали за міцнісним параметром, який визначався відношенням відповідної міцності при стиску чи розтягу при згині на 28 добу до максимально можливої відповідної міцності на 28 добу серед випробуваної партії зразків. Досліджувані цементобетони отримували з бетонних сумішей різних складів, як з додаванням поліпропіленових та базальтових фібр (волокон), так і без них.

Поліпропіленові фібри вводили у кількості: 0,3 кг/м³; 0,6 кг/м³; 0,9 кг/м³; 1,2 кг/м³; 1,5 кг/м³. Базальтові волокна вводили в кількості: 3,75 (4,0) кг/м³; 7,5 (8,0) кг/м³; 15,0 (16,0) кг/м³; 22,5 (24,0) кг/м³; 30,0 (32,0) кг/м³. Кількість портландцементу змінювалась від 375 до 400 кг/м³. Довжина поліпропіленової фібри та базальтового волокна становила 12 мм.

Результати дослідження міцнісного параметру при стиску цементобетонів з додаванням поліпропіленової і базальтової фібр наведено на рис. 1 та рис. 2.

Застосування поліпропіленової та базальтової фібр в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій практично не призводить до зміни міцнісного параметру при стиску цементобетону. Коливання значень міцнісного параметру при стиску цементобетонів з використанням обох видів фібр знаходиться в межах до 5 %, що майже відповідає діапазону похибки експерименту. Така незначна зміна міцнісного параметру при стиску досліджуваних цементобетонів може пояснюватись багатощебневим складом цементобетону, що підтверджується науковим експериментом в роботах [9], коли перехід складу цементобетонну від багато щебеневого до піщаного призводить до значного підвищення міцності при стиску за рахунок додавання волокон.



Рисунок 1 – Залежність зміни міцнісного параметру бетону при стиску від кількості введеної поліпропіленової фібри та кількості портландцементу

Джерело: розроблено автором



Рисунок 2 – Залежність зміни міцнісного параметру бетону при стиску від кількості введеної базальтової фібри та кількості портландцементу

Джерело: розроблено автором

У відповідності до рис. 3 та рис. 4 встановлено суттєвий вплив концентрації волокна в цементобетоні на його міцнісний параметр розтягу при згині. Зокрема, збільшення вмісту поліпропіленового волокна до 0,9-1,0 кг/м³ сприяє 34-38 % збільшенню параметру міцності на розтяг при згині залежно від кількісного вмісту портландцементу. Більший вміст портландцементу сприяє більшій міцності на розтяг при згині цементобетону за однакової кількості поліпропіленового волокна. Подальше збільшення поліпропіленової фібри в цементобетонні (понад 0,9-1,0 кг/м³) не доцільне, бо призводить до зниження міцності на розтяг при згині. Збільшення концентрації поліпропіленового волокна на 0,3 кг/м³ від 0 кг/м³ до 0,9-1,0 кг/м³ сприяє 1/3 підвищення міцності на розтяг при згині від максимального.

При використанні базальтового волокна теж спостерігається максимум міцнісного параметру цементобетону при згині (рис. 4), хоча приріст міцнісного параметру на розтяг при згині дещо менший. Максимум міцнісного параметра досягається при значно більшій кількості базальтового волокна у порівнянні з поліпропіленовою фіброю. Зокрема, збільшення вмісту базальтового волокна до 15,0-

16,0 кг/м³ сприяє 28-30 % збільшенню параметру міцності на розтяг при згині залежно від кількісного вмісту портландцементу. Це може бути пов'язане з: більшим стиранням базальтового волокна у порівнянні з поліпропіленовою фіброю при перемішуванні компонентів в бетонній суміші, різним характером новоутворень на поверхні розглянутих волокон, різною контактною міцністю на межі волокно – цементобетонна матриця, а також впливом лужного середовища цементобетону при його тужавінні та твердінні (початковий етап) на базальтове волокно.



Рисунок 3 – Залежність зміни міцнісного параметру бетону при згині від кількості введеної поліпропіленової фібри та кількості портландцементу

Джерело: розроблено автором

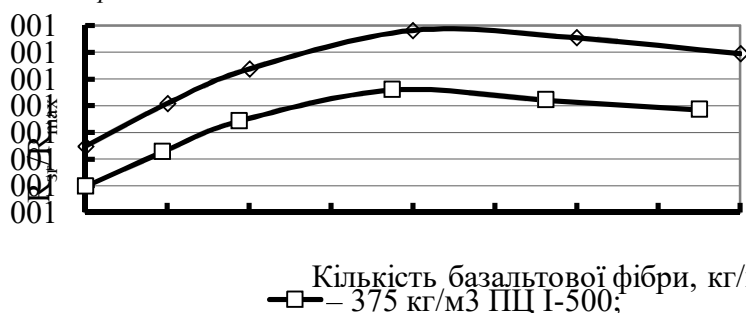


Рисунок 4 – Залежність зміни міцнісного параметру цементобетону при згині від кількості введеної базальтової фібри та кількості портландцементу

Джерело: розроблено автором

Надзвичайно інформативним показником цементобетонів є його щільність. При введенні поліпропіленової та базальтової фібр до складу цементобетону спостерігається єдиноспрямована зміна його середньої щільності (табл. 1).

Таблиця 1 – Зміна середньої щільності цементобетонів з додаванням фібр

Зміна середньої щільності цементобетонів залежно від вмісту волокна (фібри) при 400 кг/м ³ портландцементу ПЦ I-500, кг/м ³					
Поліпропіленові					
0 кг/м ³	0,3 кг/м ³	0,6 кг/м ³	0,9 кг/м ³	1,2 кг/м ³	1,5 кг/м ³
контрольний	-5	-10	-16	-20	-29
Базальтові					
0 кг/м ³	4,0 кг/м ³	8,0 кг/м ³	16,0 кг/м ³	24,0 кг/м ³	32,0 кг/м ³
контрольний	-3	-7	-14	-16	-38

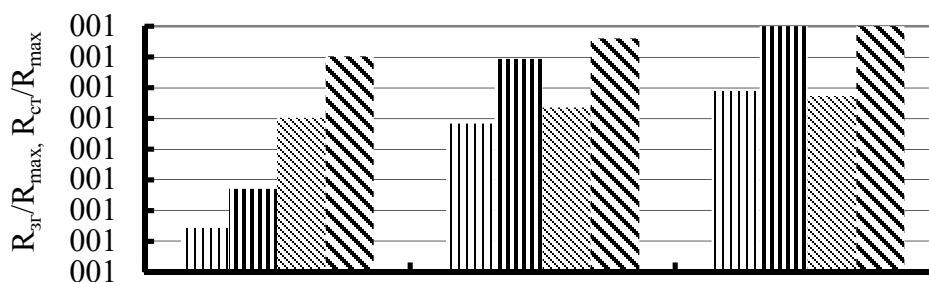
Примітка: знак «-» свідчить про зменшення середньої щільності

Джерело: розроблено автором

Додавання поліпропіленового волокна в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій призводить до зменшення середньої щільності цементобетону. Поясненням може слугувати наявність двох конкуруючих фізико-хімічних процесів.

Перший сприяє появі новоутворень на поверхні поліпропіленових волокон, як це показано в роботі Бражник Г.В. [12], завдяки яким підвищується середня щільність. Другий процес сприяє зменшенню середньої щільності по мірі насичення цементобетону поліпропіленовим волокном, за рахунок меншої щільності останнього приблизно у 2,4 рази. Крім того, введення поліпропіленової фібри сприяє додатковому повітровтягуванню в цементобетонну суміш на стадії приготування при перемішуванні компонентів на що також вказано в [12]. Введення поліпропіленової фібри вище критичної концентрації, що відповідає максимуму параметру міцності на розтяг при згині, призводить до зниження середньої щільності за рахунок можливого розсування зерен щебеню волокном та комкуванням волокон. Введення базальтового волокна в усьому діапазоні досліджуваних концентрацій також призводить до зниження середньої щільності, аналогічно введенню поліпропіленових фібр, хоча величина зниження залишається меншою. Щільність цементобетону з використанням базальтових волокон зменшується з збільшенням їх кількості навіть не зважаючи на те, що базальтові волокна мають дещо більшу щільність ніж цементобетон. Поясненням отриманих результатів може бути більша кількість втягнутого повітря що залишається розподіленим в цементобетоні з більшим вмістом базальтового волокна. Наростання параметру міцності на розтяг при згині цементобетонів з додаванням поліпропіленових або базальтових фібр на противагу зменшенню їх середньої щільності може пояснюватись тим, що розподіл фібр в цементобетонній матриці перешкоджає процесу руйнування при прикладеному навантаженні не зважаючи на більшу кількість повітряних порожнин.

Аналіз результатів експериментальних досліджень представлених на рис. 5 показав, що на параметри міцності при стиску та розтязі при згині цементобетону з виростанням портландцементу частково заміненого молотим шлаком (ПЦ ІІ/А-ІІІ 500) також впливає наявність базальтової або поліпропіленової фібри. Кількість базальтового волокна становила 15-16 кг/м³, а поліпропіленової фібри – 0,9 кг/м³, що було визначено вище розглянутим аналізом для цементобетону на основі суто клінкерного портландцементу ПЦ І-500.



Кількість базальтової або поліпропіленової фібри, кг/м³

|| – згин, 375 кг/м³ ПЦ ІІ/А-ІІІ 500; ||| – згин, 400 кг/м³ ПЦ ІІ/А-ІІІ 500

⊘ – стиск, 375 кг/м³ ПЦ ІІ/А-ІІІ 500; ⊞ – стиск, 400 кг/м³ ПЦ ІІ/А-ІІІ 500

Рисунок 5 – Залежність зміни міцнісного параметру цементобетону при згині та стиску з використанням базальтової або поліпропіленової фібри та кількості портландцементу

Джерело: розроблено автором

Параметр міцності при стиску цементобетонну з виростанням портландцементу частково заміненого молотим шлаком (ПЦ ІІ/А-ІІІ 500) змінюється в межах до 5 % при введенні базальтового чи поліпропіленового волокна. Такі зміни можна вважати такими, що знаходяться в межах похибки експерименту. Параметр міцності на розтяг при згині цементобетонну на основі портландцементу частково заміненого молотим

шлаком (ПЦ II/A-III 500) з використанням базальтового чи поліпропіленового волокна збільшується на 25-28 % та на 32-35 %, відповідно. Діапазон збільшення параметру міцності при згині залежить від кількості в'язучого в цементобетоні. Загалом, приріст параметрів міцності при стиску та розтязі при згині цементобетону з використанням портландцементу ПЦ II/A-III 500 при додаванні базальтових чи поліпропіленових волокон близький до приросту в цементобетоні з використанням портландцементу ПЦ I-500, хоча залишається дещо меншим.

Висновки. Розглянуто вплив поліпропіленових та базальтових фібр в широкому діапазоні концентрацій на фізико-механічні властивості дорожнього цементобетону. Застосування поліпропіленової та базальтової фібр в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій практично не призводить до зміни міцнісного параметру при стиску цементобетону, який змінюється до 5 %. Визначено, що максимальному параметру міцності на розтяг при згині дорожнього цементобетону відповідає 0,9-1,0 кг/м³ поліпропіленової фібри, а базальтового волокна – 15,0-16,0 кг/м³. Оптимальні концентрації базальтового волокна та поліпропіленової фібри в складі цементобетону на основі суто клінкерного портландцементу ПЦ I-500, що призводять до максимуму параметру міцності на розтяг при згині, сприяють підвищенню цього максимуму на 28-30 % та на 34-38 % залежно від кількості цементу, відповідно. Додавання базальтового волокна або поліпропіленової фібри в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій призводить до зменшення середньої щільності цементобетону. Першопричинним поясненням може слугувати більша кількість втягнутого повітря що залишається розподіленим в цементобетоні з більшим вмістом досліджуваних фібр. Зміна міцнісних показників цементобетону на основі портландцементу частково заміненого молотим шлаком ПЦ II/A-III 500 з додаванням оптимальної кількості поліпропіленових фібр та базальтових волокон схожа на зміну цих показників цементобетону на основі суто клінкерного портландцементу ПЦ I-500. Відмінність полягає лише у дещо меншому прирості параметру міцності на розтяг при згині (2-3%) цементобетону на основі портландцементу частково заміненого молотим шлаком незалежно від виду доданого волокна. Введення оптимальної кількості поліпропіленового волокна (фібри) призводить до більших значень параметру міцності на розтяг при згині дорожнього цементобетону у порівнянні з цементобетоном на основі базальтового волокна не залежно від суто клінкерного чи частково заміненого молотим доменним шлаком портландцементу, що пояснюється специфікою та особливостями волокон.

Список літератури

1. Лапченко А. С. Реологічні властивості асфальтополімербетонів при динамічному деформуванні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків, 2010. 22 с.
2. Experiences with 76 t and 34,5 m. The Nordic perspective: EMS and EMS2 trucks – the positive outcomes and lessons learned. *Revision of the Weights and Dimension Directive*. 17 Nov. 2022.
3. Lindsey R., Dahlman L. Climate change: global temperature / reviewed by Jessica Blunden. *Climate.gov* : веб-сайт. URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature> (дата звернення: 10.06.2025).
4. McCulloch M. T., Winter A., Sherman C. E. et al. 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 °C. *Nature Climate Change*. 2024. № 14. P. 171–177. DOI: 10.1038/s41558-023-01919-7.
5. Hannant D. J. *Fibre-cements and concretes*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 1978. 228 p.
6. Liu H., Wang N. Computer model and analysis on pavement performance and pavement structure of polypropylene fibre material concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1578, № 1. 012057. URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1578/1> (дата звернення: 10.06.2025).
7. Menyhard A., Menczel J., Abraham T. Polypropylene fibers. *The Textile Institute Book Series. Thermal Analysis of Textiles and Fibers*. 2020. № 12. P. 205–222. DOI: 10.1016/B978-0-08-100572-9.00012-4.
8. Базальтове волокно. *Вікіпедія. Вільна енциклопедія* : веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Базальтове_волокно (дата звернення: 16.06.2025).
9. Толмачов С. М., Беліченко О. А., Дорошенко М. А., Покуса Ю. П. Порівняльна характеристика застосування поліпропіленової і базальтової фібри у дорожніх бетолах. *Механіка та математичні методи*. 2022. № 2. С. 65–74. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17012/1/MMM%20%E2%84%96%20%282%29.pdf> (дата звернення: 16.06.2025).

10. Chen M., Ren C., Liu Y., Yang Y., Wang E., Liang X. Effects of polypropylene fibre and strain rate on dynamic compressive behaviour of concrete. *Materials*. 2019. № 12. P. 1797. DOI: 10.3390/ma12111797.
11. Yermak N., Pliya P., Beaucour A.-L., Simon A., Noumowe A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 132. P. 240–250. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120.
12. Бражник Г. В. Монолітні дорожні цементні бетони високої морозостійкості з органомінеральним комплексом та фіброю : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків, 2015. 23 с.
13. Advanced civil infrastructure materials / ed. by H. C. Wu. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2006. 375 p.
14. Badr A., Ashour A., Platten A. Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2006. № 32 (11). P. 107–120. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.003.
15. Jafariar N. Shrinkage behavior of steel-fibre-reinforced-concrete pavements : Doctor of Philosophy's thesis. Sheffield, 2012. 224 p.
16. Sliwinski J., Zych T. Contact zone between cement paste and fibre and its influence on the water permeability of fibre reinforced concrete. *International Symposium on Brittle Matrix Composites – BMC 5* (Warsaw, 13–15 October 1997). Warsaw : BIGRAF and Woodhead Publ., 1997. P. 54–63.
17. Cao Y., Yu Q., Brouwers H. Numerical investigation of fibers effects in SFRC under dynamic tension. *9th International Symposium on Cement and Concrete* (Wuhan, 31 October – 01 November 2017). Wuhan : Wuhan University of Technology, 2017. P. 1–7.
18. Бабич Є. М., Андрійчук О. В., Ужegov С. О., Шаповал І. В. Застосування сталевібробетону в дорожньому будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2015. Вип. 4. С. 3–9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2015_4_3 (дата звернення: 16.06.2025).
19. Avishreshth S., Bansal P., Chopra T. Characterization of steel fiber reinforced pervious concrete for applications in low volume traffic roads. *Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure* (New Delhi, 12–14 December 2017). New Delhi : The Institution of Engineers, 2018. P. 93–102.
20. Karakurt C., Turap A. Properties of concrete pavements produced with different type of fibers. *Journal of the Turkish Chemical Society*. 2017. Vol. 1. P. 17–24. URL: <https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/items/14d55f8a-5293-4de5-b943-fae77578b967> (дата звернення: 10.06.2025).
21. Ullah F., Al-Neshawy F., Punkki J. Early age autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete. *Nordic Concrete Research*. 2018. Vol. 59, № 1. P. 59–72. DOI: 10.245781tamd/2018-12478.
22. Amreen N., Milind V. A review on effect of fiber reinforced concrete on rigid pavement. *Conf. Smarter Solution for Better Tomorrows* (Badnera, 9 December 2015). Badnera : PRMIT&R, 2015. P. 222–228.
23. Толмачов Д. С. Тріщиностійкі дрібнозернисті цементні бетони транспортного призначення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків, 2015. 20 с.
24. Khadhum M. M., Essa M. S., Hashim K. S. Effect of shape and type of steel fibre on some mechanical properties of reinforced concrete. *Journal of Babylon University. Engineering Sciences*. 2006. Vol. 12. P. 1–11. URL: https://www.researchgate.net/publication/317826132_EFFECT_OF_SHAPE_AND_TYPE_OF_STEEL_FIBRE_ON_SOME_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_REINFORCED_CONCRETE (дата звернення: 10.06.2025).
25. Лапченко А. С. Вплив меленого доменного шлаку та пластифікуючої добавки на міцнісні властивості дорожнього бетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2025. № 23. С. 143–154. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14.

References

1. Advanced civil infrastructure materials. (2006). H. C. Wu (Ed.). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
2. Amreen, N., & Milind, V. (2015, December 9). A review on effect of fiber reinforced concrete on rigid pavement. In *Conference Smarter Solution for Better Tomorrows* (pp. 222–228). Badnera: PRMIT&R.
3. Avishreshth, S., Bansal, P., & Chopra, T. (2018). Characterization of steel fiber reinforced pervious concrete for applications in low volume traffic roads. In *Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure* (pp. 93–102). New Delhi: The Institution of Engineers.
4. Badr, A., Ashour, A., & Platten, A. (2006). Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 32(11), 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.05.003>
5. Babich, Ye. M., Andriichuk, O. V., Uzhegov, S. O., & Shapoval, I. V. (2015). Application of steel fiber concrete in road construction. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 4, 3–9. http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2015_4_3 [in Ukrainian].
6. Bazaltove volokno [Basalt fiber]. (2025). *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Базальт_волокно (Accessed: 16.06.2025) [in Ukrainian].
7. Brazhnyk, H. V. (2015). Monolithic road cement concretes of high frost resistance with organomineral complex and fiber (Candidate of Technical Sciences dissertation abstract, 05.23.05). Kharkiv. 23 p. [in Ukrainian].
8. Cao, Y., Yu, Q., & Brouwers, H. (2017, October 31 – November 1). Numerical investigation of fibers effects in SFRC under dynamic tension. In *9th International Symposium on Cement and Concrete* (pp. 1–7). Wuhan: Wuhan University of Technology.
9. Chen, M., Ren, C., Liu, Y., Yang, Y., Wang, E., & Liang, X. (2019). Effects of polypropylene fibre and strain rate on dynamic compressive behaviour of concrete. *Materials*, 12, 1797. <https://doi.org/10.3390/ma12111797>
10. Climate.gov. (2025). Lindsey, R., & Dahlgren, L. Climate change: global temperature (reviewed by J. Blunden). *Climate.gov*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature> (Accessed: 10.06.2025).

11. Experiences with 76 t and 34,5 m. (2022, November 17). *The Nordic perspective: EMS and EMS2 trucks – the positive outcomes and lessons learned. Revision of the Weights and Dimension Directive*.
12. Hannant, D. J. (1978). *Fibre-cements and concretes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
13. Jafarifar, N. (2012). *Shrinkage behavior of steel-fibre-reinforced-concrete pavements* (Doctor of Philosophy's thesis). Sheffield.
14. Karakurt, C., & Turap, A. (2017). Properties of concrete pavements produced with different type of fibers. *Journal of the Turkish Chemical Society, 1*, 17–24. <https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/items/14d55f8a-5293-4de5-b943-fae77578b967> (Accessed: 10.06.2025).
15. Khadhum, M. M., Essa, M. S., & Hashim, K. S. (2006). Effect of shape and type of steel fibre on some mechanical properties of reinforced concrete. *Journal of Babylon University. Engineering Sciences, 12*, 1–11. https://www.researchgate.net/publication/317826132_EFFECT_OF_SHAPE_AND_TYPE_OF_STEEL_FIBRE_ON_SOME_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_REINFORCED_CONCRETE (Accessed: 10.06.2025).
16. Lapchenko, A. S. (2010). Rheological properties of asphalt polymer concretes under dynamic deformation (Candidate of Technical Sciences dissertation abstract, 05.23.05). Kharkiv. 22 p. [in Ukrainian].
17. Lapchenko, A. S. (2025). Influence of ground blast-furnace slag and plasticizing additive on strength properties of road concrete. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction, 23*, 143–154. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14) [in Ukrainian].
18. Liu, H., & Wang, N. (2020). Computer model and analysis on pavement performance and pavement structure of polypropylene fibre material concrete. *Journal of Physics: Conference Series, 1578(1)*, 012057. <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1578/1> (Accessed: 10.06.2025).
19. McCulloch, M. T., Winter, A., Sherman, C. E., et al. (2024). 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 °C. *Nature Climate Change, 14*, 171–177. doi.org/10.1038/s41558-023-01919-7
20. Menyhard, A., Menczel, J., & Abraham, T. (2020). Polypropylene fibers. In *The Textile Institute Book Series. Thermal Analysis of Textiles and Fibers, 12*, 205–222. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100572-9.00012-4>
21. Sliwinski, J., & Zych, T. (1997, October 13–15). Contact zone between cement paste and fibre and its influence on the water permeability of fibre reinforced concrete. In *International Symposium on Brittle Matrix Composites – BMC 5* (pp. 54–63). Warsaw: BIGRAF and Woodhead Publ.
22. Tolmachov, D. S. (2015). Crack-resistant fine-grained cement concretes for transport purpose (Candidate of Technical Sciences dissertation abstract, 05.23.05). Kharkiv. 20 p. [in Ukrainian].
23. Tolmachov, S. M., Bielichenko, O. A., Doroshenko, M. A., & Pokusa, Yu. P. (2022). Comparative characteristics of polypropylene and basalt fibers in road concretes. *Mechanics and Mathematical Methods, 2*, 65–74. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17012/1/MMM%20%E2%84%968%20%282%29.pdf> (Accessed: 16.06.2025) [in Ukrainian].
24. Ullah, F., Al-Neshawy, F., & Punkki, J. (2018). Early age autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete. *Nordic Concrete Research, 59(1)*, 59–72. <https://doi.org/10.245781tamd/2018-12478>
25. Yermak, N., Pliya, P., Beaucour, A.-L., Simon, A., & Noumowe, A. (2017). Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties. *Construction and Building Materials, 132*, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120>
26. Yu, F., et al. (2023). Techno-economic analysis of residential building heating strategies for cost-effective upgrades in European cities. *iScience, 107541*. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107541> (Accessed: 31.01.2025).

Artem Lapchenko, Sr. Researcher, PhD tech. sci

National Transport University, Kyiv, Ukraine

Comparison of Road Cement Concrete Properties with Polypropylene and Basalt Fibers Addition

The aim and objectives of the study are to establish the influence of different dosages of basalt and polypropylene fibers in a wide range of concentrations on the main physical and mechanical indicators of road cement concrete based on Portland cement with its partial replacement by ground blast furnace slag and based only on clinker Portland cement. The article presents the results of the influence of different dosages of basalt fibers and polypropylene fibers in a wide range of concentrations on the physical and mechanical properties of road cement concrete. It was found that the introduction of polypropylene fibers and basalt fibers has almost no effect on the compressive strength of cement concrete. Based on experimental studies, the concentration of polypropylene and basalt fibers was determined, which corresponds to the maximum tensile strength in bending of cement concrete. This concentration is 0.9-1.0 kg/m³ of polypropylene fiber and 15.0-16.0 kg/m³ of basalt fiber. A change in the average density of cement concretes with the addition of polypropylene fibers and basalt fibers was established. The introduction of the optimal amount of polypropylene fiber (fiber) leads to higher values of the tensile strength parameter in bending of road cement concrete compared to cement concrete based on basalt fiber. The change in the strength indicators of cement concrete based on Portland cement partially replaced by ground slag with the addition of the optimal amount of polypropylene fibers and basalt fibers is similar to the change in these indicators of cement concrete based on purely clinker Portland cement.

basalt fibers, bending, concentration, strength, polypropylene fiber, compression, cement concrete

Одержано (Received) 27.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025

УДК 624.042.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.366-374](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.366-374)

В. А. Пашинський, проф., д-р техн. наук, **М. В. Пашинський**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: pva.kntu@gmail.com

Сполучення навантажень на покрівлі виробничих і цивільних будівель

Для восьми типів покриттів, конструкції яких відповідають вимогам норм і є характерними для сучасного будівництва, визначені статистичні характеристики ваги окремих шарів та покриттів у цілому. Коефіцієнти сполучення навантажень від ваги усіх шарів змінюються в межах від 0,91 до 1,0. З урахуванням статистичних характеристик постійного навантаження від ваги покриттів та снігу обчислені коефіцієнти сполучення навантажень на покрівлі у межах 0,92...1,0 та встановлена їх залежність від характеристик діючих навантажень.

навантаження від ваги покриттів, снігові навантаження, коефіцієнти сполучення

Постановка проблеми. Випадковий характер навантажень від снігу та ваги покриттів обумовлює необхідність імовірнісного розв'язання задачі про урахування спільної дії цих навантажень на несучі конструкції. Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 "Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд із Зміною №1" [1] ефект від спільної дії навантажень слід враховувати спільними чи роздільними коефіцієнтами сполучення, які встановлюються з умови рівнозабезпеченості сумарного навантажувального ефекту та розрахункових значень окремих навантажень і можуть бути рівними або меншими від одиниці. Чинні ДБН В.1.2-2:2006 "Навантаження і впливи" [2] не передбачають урахування коефіцієнтів сполучення постійних навантажень, а також постійного та снігового навантаження. Результати досліджень можливих значень коефіцієнтів сполучення навантажень від ваги шарів покриттів та снігу в доступній літературі не виявлені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційний спосіб урахування спільної дії навантажень викладено в ДБН В.1.2-2:2006 "Навантаження і впливи" видання 2007 року [3]. Сума навантажувальних ефектів (зусиль чи напружень в елементі конструкції) множилася на коефіцієнт сполучення, який для постійних навантажень приймався рівним $\psi = 1$, для змінних тривалих навантажень $\psi = 1$, а для двох і більше короткочасних $\psi = 0,9$. При цьому слід було розглянути декілька варіантів сполучення навантажень з урахуванням логіки їх взаємодії. Чинні ДБН від 2020 р. [2] передбачають урахування роздільних коефіцієнтів сполучення, які залежать від вкладу змінних навантажень у сумарний навантажувальний ефект. В комбінації постійних та одного змінного навантаження приймається коефіцієнт сполучення $\psi = 1$.

Роздільні коефіцієнти сполучення встановлені також в EN 1990:2002 [4], аналогом яких в Україні є ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 "Основи проектування конструкцій" [5]. Провідне навантаження враховується без зниження, а супутні навантаження множаться на коефіцієнти сполучення, вказані в [4, 5] залежно від виду навантаження, мети розрахунку та призначення будівлі, на яку воно діє. При цьому слід розглянути декілька сполучень з різними провідними навантаженнями та вибрати найнебезпечнішу комбінацію. Такий підхід вимагає виконання значної кількості розрахунків при різних виборах провідного навантаження.

Статистично обґрунтовані значення коефіцієнтів сполучення, отримані методами

теорії надійності на базі реальних статистичних даних про навантаження, визначені в результаті досліджень К.С. Лосицької, Б.Ю. Уварова та П.Д. Окулова, С.Ф. Пічугіна та В.А. Пашинського. Результати цих та інших досліджень спільної дії навантажень на будівельні конструкції стисло викладені в [6, 7] та узагальнені в статтях [8, 9]. У роботах К.С. Лосицької на основі опису снігового та вітрового навантажень у формі послідовностей максимальних значень із застосуванням методу статистичного моделювання отримані коефіцієнти сполучення зусиль в конструкціях при спільній дії навантажень від снігу, вітру, мостових і підвісних кранів. Дослідження П.Д. Окулова присвячені урахуванню спільної дії на конструкції покриттів виробничих будівель навантажень від снігу та підвісних кранів. Імовірнісні моделі навантажень обґрунтовані за результатами метеорологічних спостережень в різних географічних районах та дослідження навантажень від підвісних кранів у режимі нормальної експлуатації декількох цехів.

Дослідження В.А. Пашинського [6] базуються на реальних результатах метеорологічних спостережень за вітром і сніговим покривом приблизно на сотні метеостанцій, переважна більшість яких розташована на території України. На базі цих даних розроблені ймовірнісні моделі ваги снігового покриву та вітрового тиску у формі квазістаціонарних диференційованих випадкових процесів з річним періодом нестационарності. Імовірнісні моделі навантаження від мостових кранів у формі стаціонарних диференційованих випадкових процесів з нормальним розподілом ординати побудовані шляхом узагальнення результатів раніше виконаних досліджень кранових навантажень у цехах машинобудівельної та металургійної промисловості. За розробленою ймовірнісною методикою, стисло викладеною в [6, 7], та узагальненими характеристиками процесів навантажень отримані коефіцієнти сполучення зусиль в елементах каркасів виробничих будівель від спільної дії снігу, вітру та мостових кранів. Представлена аналітичним виразом залежність спільного коефіцієнта сполучення від часток трьох навантажень у складі сумарного зусилля утворює провисаючу поверхню з мінімальним значенням близько 0,7.

Результати роботи [6] були включені до ДБН [10] та пізніше перенесені в ДСТУ Б В.2.6-210:2016 "Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються" [11]. Для визначення коефіцієнта сполучення за [11] необхідно встановити частки снігового, вітрового та кранового навантажень у складі сумарного зусилля в елементі конструкції, що у випадку складного напруженого стану вимагає знання перерізів усіх елементів конструкції. Тому ця методика рекомендована нормами [11] для використання в перевіірочних розрахунках існуючих конструкцій, для яких перерізи конструктивних елементів вже відомі.

Виконаний огляд показав, що існують та використовуються при проєктуванні декілька методів урахування спільної дії змінних навантажень, але жоден з чинних нормативних документів [2...5, 11] не передбачає зниження сумарного розрахункового ефекту при урахуванні декількох постійних та одного змінного навантаження.

Мета роботи: отримати коефіцієнти сполучення навантажень від ваги різних шарів покриттів, а також від снігу та ваги покриттів; проаналізувати доцільність їх урахування та можливий економічний ефект.

Статистичні характеристики навантажень. Для обчислення коефіцієнтів сполучення необхідно представити усі навантаження у формі випадкових величин. Згідно з [7, 15], навантаження від ваги окремих шарів покриття та покрівлі в цілому описуються нормальним законом розподілу, для чого слід вказати математичні сподівання та стандарти.

Для аналізу обрані вісім конструкцій покриттів, які відповідають вказівкам ДБН [12] в частині конструктивних рішень, вимогам ДБН [13] до опору теплопередачі та при цьому охоплюють практично увесь можливий діапазон вагових характеристик. Найпростішим і найлегшим є холодне покриття зі сталевого профільованого настилу по прогонах, яке може використовуватися для навісів, ангарів та холодних складських приміщень. Найскладнішими за конструкцією і найважчими є експлуатовані покриття з рослинним шаром або з тротуарною плиткою, які зазвичай використовуються в житлових і громадських будівлях.

Для кожного з покриттів підібрана товщина теплоізоляційного шару, яка забезпечує опір теплопередачі R_{Σ} відповідно до вимог ДБН [13] та пошарово підраховані характеристичне та граничне розрахункове значення навантаження від його ваги згідно з вимогами ДБН [2]. Технічні характеристики матеріалів прийняті за ДСТУ [14], а коефіцієнти варіації середньої густини встановлені за узагальненими даними [7, 15]. Стандарт навантаження від ваги кожного шару покриття дорівнює добутку характеристичного значення $G_0 = M_G$ на відповідний коефіцієнт варіації. Загальний стандарт розподілу сумарного навантаження від ваги усієї конструкції покриття обчислюється відомою формулою теорії ймовірностей:

$$S_G = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{Gi}^2}, \quad (1)$$

де N – кількість шарів покриття;

S_{Gi} – стандарти ваги i -того шару.

Узагальнений коефіцієнт надійності за навантаженням від ваги усього покриття дорівнює відношенню його граничного розрахункового значення до характеристичного $\gamma_f = G_m/G_0$. Отримані таким чином характеристики покриттів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики покриттів та навантажень від них

Тип покр.	Призначення та загальна характеристика покриття	N	R_{Σ}	G_0 , Па	γ_f	G_m , Па	S_G , Па
Тип 1	Холодне покриття для навісів та складів із профнастилу по прогонах	2	0,16	210	1,05	221	3,23
Тип 2	Покриття по профнастилу для виробничих будівель з надлишками тепла	6	0,57	298	1,08	321	4,77
Тип 3	Утеплене покриття для виробничих будівель на основі профнастилу	6	2,17	418	1,11	465	18,3
Тип 4	Утеплене покриття для громадських будівель на основі профнастилу	6	7,07	996	1,20	1196	73,7
Тип 5	Експлуатована покрівля з рослинним шаром по профнастилу для цивільних будівель	9	6,92	1247	1,25	1554	107,1
Тип 6	Утеплене покриття для виробничих будівель на основі ребристих залізобетонних плит	6	2,16	2810	1,17	3301	205,2
Тип 7	Утеплене покриття для цивільних будівель на основі залізобетонних плит	6	6,99	4265	1,16	4945	318,6
Тип 8	Експлуатована покрівля з тротуарною плиткою для цивільних будівель на основі залізобетонних плит	6	6,94	6038	1,14	6897	432,3

Джерело: розроблено авторами.

Характеристичні значення ваги снігового покриву, наведені на карті районування ДБН [2], змінюються по території України від 800 Па для першого снігового району до 1800 Па для шостого снігового району. Статистичні характеристики ваги снігового покриву визначалися та аналізувалися в численних дослідженнях, зокрема в [6, 7]. З метою отримання узагальнених результатів, які

відображатимуть можливі значення характеристик снігового навантаження на усій території України, для подальших розрахунків скористаємося результатами роботи [16], у якій за даними метеостанцій України отримані математичні сподівання та стандарти річних максимумів ваги снігового покриву для кожного з шести районів, виділених на карті територіального районування ДБН [2]. В таблиці 2, запозиченій з [16], наведені такі характеристики снігового покриву:

Номер району на карті ДБН [2].

N – кількість метеостанцій, за даними яких в [16] були визначені статистичні характеристики.

Q_0 – характеристичне значення ваги снігового покриву з карти ДБН [2].

M_Q – математичне сподівання розподілу річних максимумів.

S_Q – стандарт розподілу річних максимумів.

V_Q – коефіцієнт варіації розподілу річних максимумів.

Таблиця 2 – Районні характеристики річних максимумів ваги снігового покриву

Район ДБН [2]	N	Q_0 , Па	M_Q , Па	S_Q , Па	V_Q	Q_{50} , Па
1	11	800	211	132	0,626	554
2	23	1000	276	192	0,697	777
3	20	1200	344	224	0,651	926
4	58	1400	451	293	0,650	1213
5	43	1600	531	353	0,665	1448
6	17	1800	649	398	0,613	1683

Джерело: розроблено авторами.

В останньому стовпці таблиці 2 наведені характеристичні значення ваги снігового покриву, обчислені для періоду повторюваності $T = 50$ років через районні статистичні характеристики за формулою з [7], яка базується на описі вибірки річних максимумів законом розподілу Гумбеля:

$$Q_{50} = M_Q + S_Q \cdot [0,78 \cdot \ln(T) - 0,45] \approx M_Q + 2,6 \cdot S_Q. \quad (2)$$

З таблиці 2 видно, що значення $Q_{50} < Q_0$, тому що районні характеристичні значення Q_0 встановлені близькими до максимальних по території кожного району. Наведені в таблиці 2 значення математичного сподівання M_Q і стандарту S_Q для усіх снігових районів ДБН [2] охоплюють практично всі характеристики ваги снігового покриву, можливі на території України за винятком гірських метеостанцій, і можуть використовуватися для визначення коефіцієнтів сполучення снігового та постійного навантажень на кроквяні конструкції.

Сполучення навантажень від ваги окремих шарів покриття. Виходячи з визначення [1, 2], коефіцієнти сполучення обчислюються як відношення розрахункового значення сумарного навантаження від ваги покриття G_β з заданим рівнем забезпеченості β до суми розрахункових значень ваги окремих шарів з тим же рівнем забезпеченості:

$$\psi = G_\beta / G_m = (G_0 + t_\beta \cdot S_G) / \sum_{i=1}^N G_{mi}. \quad (3)$$

Аналіз результатів визначення навантажень від ваги покриттів показав, що рівень забезпеченості розрахункових значень навантажень від окремих шарів усіх розглянутих покриттів у середньому становить 0,96. Тому до формули (3) було підставлене значення аргументу нормального розподілу $t_\beta = 1,751$, яке відповідає

забезпеченості $\beta = 0,96$. Вихідні дані та результати обчислень за формулою (3) для восьми розглянутих типів покриттів наведені в таблиці 3 та на рисунку 1.

Таблиця 3 – Результати обчислення коефіцієнтів сполучення навантажень від ваги шарів покриття

Тип покр.	G_0 , Па	γ_f	G_m , Па	S_G , Па	ψ за (3)	ψ за (4)
Тип 1	210	1,05	221	3,23	0,978	0,999
Тип 2	298	1,08	321	4,77	0,956	0,997
Тип 3	418	1,11	465	18,3	0,969	0,990
Тип 4	996	1,20	1196	73,7	0,940	0,943
Тип 5	1307	1,25	1632	99,4	0,908	0,893
Тип 6	2810	1,19	3353	205,2	0,945	0,949
Тип 7	4265	1,16	4945	318,6	0,975	0,972
Тип 8	6038	1,14	6897	432,3	0,985	0,980

Джерело: розроблено авторами.

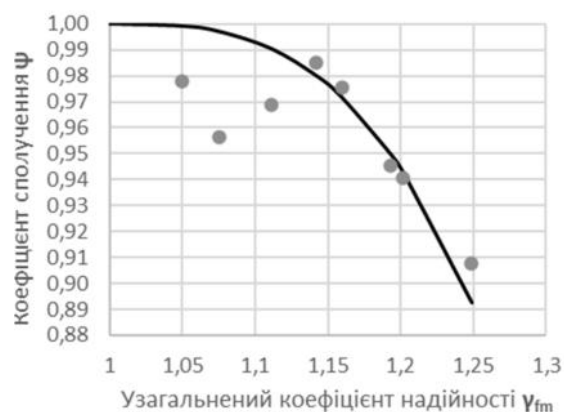


Рисунок 1 – Коефіцієнти сполучення навантажень від ваги шарів покриття
Джерело: розроблено авторами.

З таблиці 3 та рисунка 1 видно, що коефіцієнти сполучення навантажень від окремих шарів покриття змінюються в межах 0,908...0,985, загалом зменшуючись з ростом узагальнених коефіцієнтів надійності за навантаженням γ_f . Отримана залежність має досить великий розкид при малих значеннях γ_f , але в запас надійності може бути описана аналітичним виразом:

$$\psi = 1 - 7 \cdot (\gamma_f - 1)^3, \quad (4)$$

результати обчислення за яким наведені в таблиці 3 і показані на рисунку 1 суцільною лінією. Таким чином, при великих коефіцієнтах надійності γ_f урахування коефіцієнтів сполучення навантажень від окремих шарів покриття за формулою (4) може знизити сумарне розрахункове значення від ваги покриття до 10%.

Сполучення навантажень від ваги покриття та снігу. Ідентичні схеми прикладення постійного та снігового навантаження на кроквяні конструкції дозволяють безпосередньо додавати ці навантаження, не враховуючи коефіцієнти впливу, що забезпечують перехід від навантажень до зусиль в конструкціях. З іншого боку, задача ускладнюється тим, що розподіл річних максимумів ваги снігового покриву підпорядковується асиметричному закону Гумбеля [7], який істотно відрізняється від нормального розподілу Гауса. Тому розподіл випадкової величини суми постійного та снігового навантаження також відрізняється від нормального, що слід враховувати при визначенні коефіцієнтів сполучення постійного та снігового навантаження.

Методика визначення коефіцієнтів сполучення снігового й постійного навантаження побудована на основі методики розрахунків надійності, розробленої в [7, 17]. Постійне навантаження представлене нормально розподіленою величиною з математичним сподіванням M_G і стандартом S_G . Снігове навантаження задане у вигляді випадкової величини річних максимумів ваги снігового покриву, яка описується розподілом Гумбеля [7] з математичним сподіванням M_Q , стандартом S_Q та незмінним коефіцієнтом асиметрії $A_Q = 1,14$. З урахуванням спрощень унаслідок дії лише постійного й снігового навантаження та відсутності коефіцієнтів впливу, формули з [17] для числових характеристик сумарного навантаження P можна записати у вигляді:

$$M_P = M_G + M_Q, \quad S_P = \sqrt{S_G^2 + S_Q^2}, \quad A_P = 1,14 \cdot S_Q^3 / S_P^3. \quad (5)$$

У формулах (5) враховано, що коефіцієнт асиметрії нормального розподілу постійного навантаження дорівнює нулю, а коефіцієнт асиметрії розподілу Гумбеля для снігового навантаження завжди дорівнює 1,14.

Сума випадкових величин постійного і снігового навантаження описується змішаним розподілом Гумбеля-Гауса [7, 17], інтегральна функція якого має вигляд:

$$F(P) = C \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{M_P - P}{0,78 \cdot S_P} \right) - 0,577 \right] + (1 - C) \cdot F_{Gauss}(P, M_P, S_P), \quad (6)$$

де C – ваговий коефіцієнт, рівний $C = 0,8775 \cdot A_P$;

$F_{Gauss}(P, M_P, S_P)$ – функція нормального розподілу з M_P та S_P за формулами (5).

Прирівнявши функцію розподілу (6) до заданого рівня забезпеченості β , отримуємо нелінійне рівняння

$$\beta - C \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{M_P - P}{0,78 \cdot S_P} \right) - 0,577 \right] - (1 - C) \cdot F_{Gauss}(P, M_P, S_P) = 0, \quad (7)$$

чисельний розв'язок якого відносно P дає розрахункове значення сумарного навантаження, що відповідає заданій забезпеченості β .

Згідно з загальними принципами урахування спільної дії навантажень [1, 2], коефіцієнт сполучення дорівнює відношенню розрахункового значення сумарного навантаження P , визначеного як розв'язок рівняння (7) при забезпеченості $\beta = 0,98$, до суми розрахункових значень постійного та снігового навантаження, що відповідають тому ж рівню забезпеченості $\beta = 0,98$:

$$\psi = P / (Q_{50} + G_0 + 2,054 \cdot S_G). \quad (8)$$

За викладеною методикою та формулою (8) обчислені коефіцієнти сполучення для 48 комбінацій снігового й постійного навантажень (8 типів покриттів з таблиці 1 та 6 снігових районів з таблиці 2). Отримані коефіцієнти сполучення змінюються від 0,919 до 0,995. Графічний аналіз різних варіантів дозволив виявити залежність коефіцієнтів сполучення від аргументу:

$$X = G_0 \cdot (\gamma_f - 1) / Q_0. \quad (9)$$

де γ_f – узагальнений коефіцієнт надійності для постійного навантаження;

G_0 і $Q_0 = Q_{50}$ – характеристичні значення постійного та снігового навантаження.

Залежність коефіцієнтів сполучення від аргументу (9), зображена на рисунку 2, є достатньо тісною, але має досить складну форму. Спроби її опису аналітичним виразом привели до отримання надто складних формул, які незручно використовувати в практичних розрахунках. Тому прийняте рішення про графічне подання залежності коефіцієнтів сполучення від характеристик постійного та снігового навантаження. Ця залежність представлена на рисунку 2 суцільною лінією, яка дозволяє визначати коефіцієнти сполучення з достатньою для інженерних розрахунків точністю. Мінімальне значення коефіцієнта сполучення за наведеною кривою $\psi = 0,923$ відповідає аргументу $X = 0,4$ за формулою (9). Рекомендована крива відображає верхню межу дослідних точок і тим самим гарантує запас надійності при її використанні.

Наприклад, для умов більшості частини території Кіровоградської області з характеристичним значенням снігового навантаження за [2] $Q_0 = 1400$ Па отримуємо:

- для утепленої покрівлі виробничої будівлі типу 3 з $G_0 = 418$ Па та $\gamma_f = 1,11$ отримуємо $X = 0,033$ та $\psi = 0,985$;

- для утепленої покрівлі громадської будівлі типу 3 з $G_0 = 996$ Па та $\gamma_f = 1,20$ отримуємо $X = 0,033$ та $\psi = 0,947$;

- для експлуатованої покрівлі з тротуарною плиткою для громадської будівлі типу 8 з $G_0 = 6038$ Па та $\gamma_f = 1,14$ отримуємо $X = 0,142$ та $\psi = 0,929$.

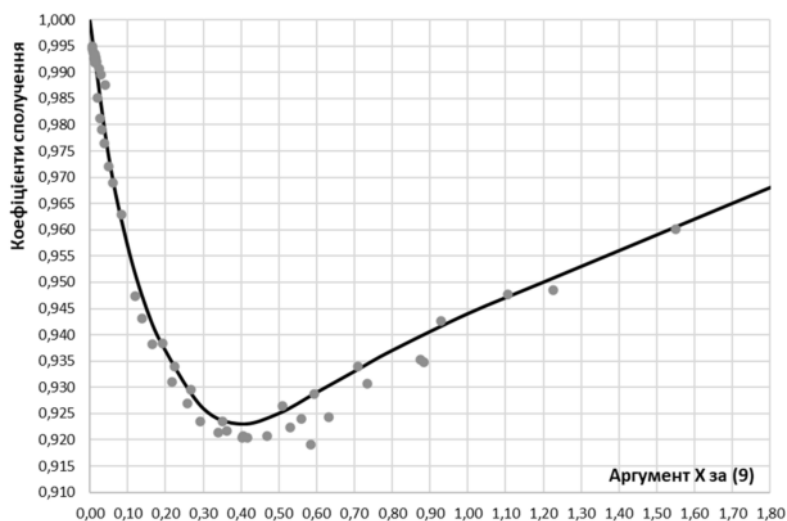


Рисунок 2 – Коефіцієнти сполучення навантажень від снігу та ваги покриття

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з таблицею 2, за винятком особливо легких покриттів типів 1 і 2, коефіцієнти надійності за постійним навантаженням змінюються від 1,11 до 1,25 і в середньому складають $\gamma_f = 1,18$. Підстановка до формули (9) цього значення та величини аргументу $X = 0,4$, при якому реалізується найменший коефіцієнт сполучення $\psi = 0,923$, дає співвідношення характеристичних значень постійного та снігового навантаження $G_0 / Q_0 \approx 2,2$. Отже, найменші значення коефіцієнтів сполучення будуть отримані при вазі покриття $G_0 \approx 1760$ Па в першому сніговому районі за ДБН [2] та $G_0 \approx 3960$ Па в шостому сніговому районі. При інших співвідношеннях ваги покриття та снігового навантаження у більшості випадків будуть отримані коефіцієнти сполучення, ближчі до одиниці. Незначне зменшення розрахункових навантажень унаслідок урахування отриманих коефіцієнтів сполучення може дати позитивний ефект при перевірочних розрахунках конструкцій, що перебувають в експлуатації.

Висновки. 1. Навантаження від ваги окремих шарів та покриттів у цілому представлені у формі нормально розподілених випадкових величин. Для восьми типів покриттів, які охоплюють практично увесь можливий діапазон вагових характеристик, математичні сподівання прийняті рівними характеристичним значенням, а коефіцієнти варіації змінюються від 0,015 для найпростіших неутеплених покриттів до 0,076 для складних багатошарових експлуатованих покриттів.

2. Коефіцієнти сполучення навантажень від ваги шарів покриттів, визначені з умови рівної забезпеченості розрахункових значень навантажень від ваги окремих шарів та покриття в цілому, змінюються в межах від 0,91 до 1,0. Для їх визначення при проектуванні встановлена залежність від узагальненого коефіцієнта надійності за навантаженням від ваги усього покриття.

3. Коефіцієнти сполучення навантажень від ваги покриттів та снігу визначені з використанням статистичних характеристик сумарної ваги покриттів восьми типів та ваги снігового покриву для шести районів ДБН В.1.2-2:2006. Методика визначення коефіцієнтів сполучення базується на описі випадкових величин постійного навантаження від ваги покриттів нормальним розподілом та змінного снігового навантаження законом розподілу Гумбеля.

4. Коефіцієнти сполучення навантажень від ваги покриттів та снігу змінюються в межах 0,92...1,0. Для їх визначення при проектуванні кроквяних конструкцій рекомендована графічна залежність від аргументу, що враховує характеристичні

значення обох навантажень, а також коефіцієнт надійності за розрахунковим значенням навантаження від ваги покриття.

5. У більшості випадків використання отриманих коефіцієнтів сполучення не дасть істотного економічного ефекту при проектуванні кроквяних конструкцій, але їх урахування може бути доцільним при виконанні перевірочних розрахунків конструкцій, які перебувають в експлуатації.

Список літератури

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. 30 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 і № 2. Київ : Мінбуд України, 2020. 68 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінбуд України, 2007. 60 с.
4. EN 1990:2002. Eurocode – Basis of structural design. [Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 116 p.
5. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDT). Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 101 с.
6. Пашинський В. А. Сполучення зусиль від атмосферних і кранових навантажень, що діють на сталеві каркаси одноповерхових виробничих будівель : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. 1986. 23 с.
7. Пашинський В. А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції на території України. Київ : УкрНДІпроектстальконструкція, 1999. 185 с.
8. Перельмутер А. В., Пічугін С. Ф. Відносно нової редакції ДБН В.1.2-14:2018. *Наука та будівництво*. 2022. Т. 32, № 2. С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-08-2022-2>.
9. Перельмутер А. В., Пічугін С. Ф. Розрахункові сполучення навантажень для перевірки надійності конструкцій (огляд). *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. 2015. Вип. 15. С. 4–47.
10. ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації. Київ : Укрархбудінформ, 1995. 46 с.
11. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ : Мінрегіон України, 2016. 53 с.
12. ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд. Київ, 2017. 43 с.
13. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996?doc_type=2 (дата звернення: 10.06.2025).
14. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 60 с. URL: <https://eurobud.ua/wp-content/uploads/2023/05/dstu-9191-2022-teploizolyacziya-budivel-metod-vyboru-teploizolyaczijnogo-materialu-dlya-uteplennya-budivel.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
15. Шульгін В. В., Карюк А. М. Імовірнісне подання технічних характеристик теплоізоляційних матеріалів. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2013. Вип. 4(39), Т. 2. С. 257–262.
16. Прокопенко Д. С., Пашинський В. А. Територіальне районування статистичних характеристик річних максимумів снігового та вітрового навантажень. *Досвід впровадження в навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій* : матеріали II Всеукр. студент. наук.-практ. конф. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С. 37–39.
17. Пашинський В. А. Інженерна методика оцінювання показників надійності стержнів металевих кроквяних ферм. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 66. С. 48–53.

References

1. DBN V.1.2-14:2018. (2018). *System for ensuring reliability and safety of building objects. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures*. Kyiv: Ministry for Regional Development of Ukraine. [in Ukrainian]
2. DBN V.1.2-2:2006. (2020). *System for ensuring reliability and safety of building objects. Loads and impacts. Design standards. With amendments No. 1 and No. 2*. Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine. [in Ukrainian]
3. DBN V.1.2-2:2006. (2007). *System for ensuring reliability and safety of building objects. Loads and impacts. Design standards*. Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine. [in Ukrainian]
4. EN 1990:2002. (2002). *Eurocode – Basis of structural design*. Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.
5. DSTU-N B V.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDT). (2009). *System of reliability and safety in construction. Guidance. Basics of structural design*. Kyiv: Minregionbud of Ukraine. [in Ukrainian]

6. Pashynskiy, V. A. (1986). *Combination of forces from atmospheric and crane loads acting on steel frames of single-story industrial buildings* (Author's abstract of PhD dissertation). Moscow. [in Russian]
7. Pashynskiy, V. A. (1999). *Atmospheric loads on building structures in the territory of Ukraine*. Kyiv: UkrNDIproektstalkonstruktziya. [in Ukrainian]
8. Perelmuter, A. V., & Pichugin, S. F. (2022). On the new edition of DBN V.1.2-14:2018. *Science and Construction*, 32(2), 19–29. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-08-2022-2> [in Ukrainian]
9. Perelmuter, A. V., & Pichugin, S. F. (2015). Design load combinations for structural reliability assessment (review). *Collected Scientific Papers of the Ukrainian Institute of Steel Structures named after V. M. Shymanovskiy*, 15, 4–47. [in Ukrainian]
10. DBN 362-92. (1995). *Assessment of the technical condition of steel structures of industrial buildings and structures in operation*. Kyiv: Ukrarkhbudininform. [in Ukrainian]
11. DSTU B V.2.6-210:2016. (2016). *Assessment of the technical condition of steel building structures in operation*. Kyiv: Ministry for Regional Development of Ukraine. [in Ukrainian]
12. DBN V.2.6-220:2017. (2017). *Roofing of buildings and structures*. Kyiv. [in Ukrainian]
13. DBN V.2.6-31:2021. (2022). *Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. Retrieved from https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996?doc_type=2 [in Ukrainian]
14. DSTU 9191:2022. (2023). *Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation material for building insulation*. Kyiv: SE “UkrNDNC.” Retrieved from <https://eurobud.ua/wp-content/uploads/2023/05/dstu-9191-2022-teploizolyacziya-budivel-metod-vyboru-teploizolyacziynogo-materialu-dlya-uteplennya-budivel.pdf> [in Ukrainian]
15. Shulhin, V. V., & Kariuk, A. M. (2013). Probabilistic representation of technical characteristics of thermal insulation materials. *Collected Scientific Papers (Mechanical Engineering, Construction)*, 4(39)(2), 257–262. [in Ukrainian]
16. Prokopenko, D. S., & Pashynskiy, V. A. (2020). Territorial zoning of statistical characteristics of annual maxima of snow and wind loads. In *Experience of introducing modern computer technologies into the educational process: Proceedings of the 2nd All-Ukrainian Student Scientific and Practical Conference* (p. 37–39). Kropyvnytskyi: CNTU. [in Ukrainian]
17. Pashynskiy, V. A. (2017). Engineering method for assessing reliability indicators of steel truss rods. *Bulletin of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 66, 48–53. [in Ukrainian].

Victor Pashynskiy, Prof., DSc., **Mykola Pashynskiy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine,

Combination of Loads on Roofs of Industrial and Civil Buildings

The study was carried out with the aim of obtaining load combination coefficients from the weight of different roof layers, as well as from the weight of tiling and snow load. The dependences of the obtained combination coefficients on the characteristics of the loads, as well as the feasibility of taking them into account in structural calculations, were analyzed.

The selected roof structures meet the requirements of the norms for structural solutions and heat transfer resistance and cover almost the entire range of possible loads from their weight. The loads from the weight of individual layers are presented in the form of normally distributed random variables given by mean values and standard deviations. The combination coefficients are determined by probabilistic methods under the condition of equal provision of the design values of the loads from the weight of individual layers and the roof as a whole. The obtained combination coefficients vary in the range from 0.91 to 1.0. To determine them during design period, a dependence on the generalized reliability coefficient for the load from the weight of the entire roof is established.

To determine the combination coefficients, statistical characteristics of the total weight of eight types of roofs and the weight of snow cover for six regions of DBN V.1.2-2:2006 were used. The method for determining the combination coefficients is based on the description of random variables of the constant load from the weight of roofs by a normal distribution and the variable snow load by the Gumbel distribution law. The obtained combination coefficients vary within 0.92...1.0. To determine them when designing truss structures, a graphical dependence on the argument is recommended, which takes into account the characteristic values of both loads, as well as the reliability coefficient for the design value of the load from the weight of the roof.

Based on the results of the research, the following dependences are recommended for determining the load combination coefficients on the weight of individual layers, as well as on the roof weight and snow load. The obtained combination coefficients should be taken into account when performing verification calculations of truss structures that are in operation.

load from the roof weight, snow loads, combination coefficients

Одержано (Received) 22.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 330.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.375-382](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.375-382)**А. В. Йовченко**, канд. техн. наук*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна**e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua*

Підвищення енергоефективності, екологічності та енергетичної незалежності автотранспортних підприємств

Розглянуто енергоаудиторські заходи для підвищення енергоефективності автотранспортного підприємства в умовах енергетичної нестабільності. Запропоновано комплекс рішень, зокрема зниження теплових втрат, оптимізацію енергоспоживання, модернізацію освітлення й водопостачання, а також впровадження альтернативних джерел енергії. Окрему увагу приділено доцільності використання твердопаливних котлів і сонячних колекторів для підвищення автономності та екологічності енергозабезпечення. Використання відновлюваних джерел енергії визначено як стратегічно важливе для стабільної роботи транспортної галузі в умовах воєнного стану. Проаналізовано потенціал таких систем щодо зменшення залежності від централізованого електропостачання, скорочення експлуатаційних витрат на енергозабезпечення та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

автотранспортне підприємство, енергетична автономія, сонячні енергосистеми, енергоефективність, відновлювані джерела енергії

Постановка проблеми. В умовах воєнного стану в Україні автотранспортні підприємства (АТП) зіштовхуються з проблемою нестабільності електропостачання та необхідністю забезпечення безперервного функціонування виробничих процесів, що негативно впливає на функціональну діяльність АТП, зарядки електричних транспортних засобів (ТЗ), а також для забезпечення роботи офісних і технічних систем АТП.

При підвищенні вартості енергоресурсів та необхідності зменшення викидів парникових газів особливої актуальності набуває питання енергоефективної роботи АТП. Зростаючі вимоги до екологічності та енергетичної автономності вимагають впровадження інноваційних підходів до управління енергоспоживанням. Енергоаудит є інструментом системного аналізу енергоспоживання підприємства, що дозволяє виявити джерела енергетичних втрат, оптимізувати процеси та обґрунтувати впровадження сучасних енергозберігаючих технологій. Зокрема, результати енергоаудиту є основою для прийняття техніко-економічно доцільних рішень щодо інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні електростанції (СЕС), з метою підвищення енергоефективності, екологічності та енергетичної незалежності АТП.

Впровадження СЕС в АТП виступає ефективним інструментом підвищення енергетичної автономії, оптимізації експлуатаційних витрат та забезпечення енергетичної безпеки АТП. Водночас, при реалізації таких рішень необхідно враховувати специфічні умови воєнного часу, зокрема підвищені ризики фізичних пошкоджень обладнання, потребу у його надійному захисті, а також забезпечення оперативної адаптації енергетичних систем до змінних умов експлуатації. Державна підтримка та зниження вартості відновлюваних джерел енергії створюють сприятливі передумови для широкомасштабного впровадження даних технологій у секторі АТП.

Зниження вартості фотоелектричних модулів, а також державна підтримка у

вигляді пільг, грантових програм і спрощеного митного оформлення обладнання для відновлюваної енергетики сприяють підвищенню доступності впровадження сонячних енергетичних систем для АТП. Водночас реалізація таких інвестиційних проєктів вимагає детального планування з урахуванням ризиків, обумовлених воєнним станом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У контексті зростання енергетичної нестабільності, зумовленої як глобальними викликами, так і збройною агресією на території України, дедалі більше наукових праць присвячено питанням забезпечення енергоне залежності критичних інфраструктур, зокрема АТП. У працях [1–3] розглядаються можливості впровадження відновлюваних джерел енергії як одного з ключових шляхів досягнення енергетичної автономності підприємств.

Проведення якісного енергоаудиту дозволяє виявити основні втрати енергії в будівлях, оптимізувати споживання ресурсів, а також обґрунтувати доцільність інвестицій у модернізацію систем опалення, вентиляції, освітлення та СЕС [4–6].

Імплементація сонячних енергетичних технологій сприяє зниженню залежності від традиційних викопних енергоресурсів, скороченню обсягів викидів вуглекислого газу та відповідає стратегічним пріоритетам України у сфері досягнення енергетичної незалежності й забезпечення сталого розвитку, включаючи адаптацію енергетичної системи до умов воєнного часу [7–9].

У контексті поступового наближення українського законодавства до норм Європейського Союзу через імплементацію екологічних та енергетичних директив, спостерігається зростання інтересу населення до впровадження сонячних електростанцій на побутовому рівні. Цей вид відновлюваної енергетики демонструє стабільне зростання популярності як серед приватних домогосподарств, так і серед АТП, що прагнуть підвищити рівень енергетичної автономії.

Постановка завдання. В умовах зростаючої енергетичної вразливості, спричиненої воєнними діями та кліматичними змінами, актуальним стає підвищення енергоефективності та енергетичної автономності АТП. Науково й практично важливим є визначення потенціалу впровадження сонячних енергетичних систем в інфраструктуру АТП для забезпечення автономного енергопостачання, зниження витрат і екологічного навантаження, що супроводжується розробленням рекомендацій щодо енергоефективної модернізації будівель.

Метою дослідження є обґрунтування можливостей впровадження сонячних електростанцій на АТП України в умовах воєнного стану для підвищення їх енергетичної незалежності та стабільності функціонування шляхом проведення енергоаудиту будівель та розроблення відповідних рекомендацій щодо енергозабезпечення.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати комплексний енергоаудит АТП, вказати заходи для визначення найбільш вразливих місць.

2. Згідно проведеного енергоаудиту надати рекомендації щодо підвищення ефективності енергозабезпечення АТП.

3. Обґрунтувати можливість впровадження СЕС в інфраструктуру АТП.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення ефективності енергозабезпечення АТП доцільним є проведення енергоаудиту його будівель, що передбачає виконання таких заходів у відповідності до чинних нормативних вимог:

1. Розрахунок теплового навантаження підприємства з формуванням теплового балансу відповідно вимог [10], з урахуванням втрат тепла через огорожувальні конструкції (зовнішні та внутрішні стіни, вікна, двері, підлогу, покрівлю), а також втрат, зумовлених вентиляційними процесами.

2. Проведення тепловізійної діагностики відповідно [11] з метою визначення місць підвищених теплових втрат, виявлення дефектів огорожувальних конструкцій, зон накопичення вологи, порушень герметичності віконних і дверних блоків, а також локалізації гідравлічних застоїв у системах опалення. Обстеження проводиться за температурного перепаду між зовнішнім та внутрішнім повітрям не менше 15 °С.

3. Оптимізація водоспоживання підприємства з метою зменшення втрат води, зокрема за рахунок модернізації систем водопостачання, впровадження регуляторної арматури, систем обліку та контролю витрат.

4. Розроблення проєкту енергоефективного освітлення, що передбачає заміну застарілих джерел світла на світлодіодні системи з автоматизованим керуванням.

5. Проєктування автономної котельні для забезпечення надійного та енергоефективного теплозабезпечення підприємства з урахуванням локальних ресурсів та режиму роботи об'єкта.

6. АТП, як енергоємні об'єкти з розвиненою інфраструктурою, є перспективною сферою для впровадження технологій відновлюваної енергетики, зокрема сонячних енергетичних систем [12]. Ефективна інтеграція таких систем в енергетичну інфраструктуру АТП дозволяє не лише знизити експлуатаційні витрати, а й забезпечити стабільне енергозабезпечення об'єктів підприємства, зменшити залежність від централізованих джерел енергії та мінімізувати викиди парникових газів.

Сонячні фотоелектричні установки можуть бути ефективно інтегровані в інфраструктуру АТП шляхом розміщення як на дахах будівель АТП, так і на прилеглих до них територіях — зокрема, на наземних опорних конструкціях або у вигляді функціональних сонячних навісів. Такі навіси можуть виконувати додаткову інфраструктурну роль, слугуючи критими паркувальними місцями для ТЗ.

Встановлення сонячних навісів забезпечує підприємствам можливість отримання екологічно чистої та відносно дешевої електроенергії з відновлюваного джерела, що сприяє зниженню витрат на енергозабезпечення. Окрім того, такі конструкції підвищують рівень комфортності для персоналу та клієнтів, захищаючи ТЗ від несприятливих атмосферних впливів (опаді, перегрів у сонячну погоду) та знижуючи споживання енергії на кондиціонування повітря в салонах автомобілів.

Сонячні навіси для автомобілів являють собою інженерні конструкції, що поєднують функцію покриття паркувального простору з можливістю генерування електроенергії за допомогою фотоелектричних модулів. Основна конструктивна особливість таких систем полягає у підвищеній висоті монтажу сонячних панелей, яка забезпечує необхідний простір для безперешкодного пересування і стоянки ТЗ. За техніко-енергетичними характеристиками сонячні навіси є аналогами наземних сонячних електростанцій, але мають додаткову перевагу в ефективному використанні вже наявної інфраструктури.

Одна з ключових переваг сонячних навісів полягає у мінімальній потребі в додатковому виділенні земельних ресурсів, що особливо важливо в умовах обмеженого простору на територіях АТП. Інтеграція таких систем дозволяє не лише забезпечити потреби підприємства в електроенергії, а й створити умови для покращення мікроклімату на парковках, зниження перегріву ТЗ та, відповідно, скорочення витрат на охолодження.

У випадках, коли в процесі експлуатації системи виникає надлишок генерованої енергії (особливо у літній період), її можливо накопичувати у буферних системах енергозбереження з метою подальшого використання в періоди відсутності інсоляції, або дана енергія може бути передана в електромережу для подальшого використання, що робить систему більш гнучкою та економічно вигідною [13]. Таким чином, сонячні

навіси сприяють формуванню розподіленої енергосистеми АТП, зменшуючи залежність від централізованого енергопостачання.

Крім того, сучасні конструкції можуть бути доукомплектовані зарядними станціями для електротранспорту, що підвищує рівень інфраструктурної готовності підприємства до експлуатації електромобілів і відповідає загальноєвропейському вектору переходу до низьковуглецевих технологій у транспортному секторі [14, 15].

Зокрема, сонячна електроенергія може застосовуватися для заряджання електромобілів [16], освітлення територій, живлення охоронних систем, інформаційного табло, компресорного, насосного та іншого обладнання АТП. Це дозволяє зменшити споживання електроенергії з централізованої мережі та сформувати автономні енергетичні мікросистеми в межах об'єкта.

Законодавчо-правова база України також створює передумови для активного впровадження інфраструктури для електротранспорту. З 1 липня 2019 року набрали чинності зміни до Державних будівельних норм ДБН В.2.3-15:2007 «Автостоянки і гаражі для легкових автомобілів», згідно з якими мінімум 5% машиномісць у новозбудованих або реконструйованих гаражах та автостоянках мають бути обладнані зарядними пристроями для ТЗ з електричними двигунами [17]. Вказані зміни є обов'язковими до виконання і спрямовані на адаптацію міської та промислової інфраструктури до потреб електромобільного транспорту.

Враховуючи вищезазначене, інтеграція фотоелектричних систем з зарядними станціями для електротранспорту на територіях АТП дозволяє поєднати вимоги нормативної відповідності з підвищенням екологічної ефективності та зниженням операційних витрат на електропостачання.

Монтаж металевих конструкцій сонячних навісів може здійснюватися як із використанням затискних опор, що не потребують проведення складних земельних робіт, так і на базі попередньо облаштованих наземних фундаментів. Такий підхід дозволяє скоротити час будівництва та знизити втручання в існуючу інфраструктуру АТП.

Інтеграція зарядних станцій для електромобілів у конструкцію сонячного навісу виступає логічним технологічним доповненням системи. Вона забезпечує зручність для кінцевих користувачів, підвищує загальну функціональність об'єкта та сприяє формуванню сучасного, естетично привабливого архітектурно-технологічного середовища.

Крім визначальних габаритних параметрів, ключовою характеристикою конструкції є кут нахилу фотоелектричних панелей. Залежно від інсоляційних умов та технічних обмежень, можливе використання як однорідних (похилених або горизонтальних) масивів панелей, так і комбінованих рішень. Наприклад, плоскі конструкції можуть поєднуватися з панелями, розташованими під кутом, з метою оптимізації площі покриття паркувального майданчика та забезпечення ефективного збору сонячної енергії. При цьому мінімальний кут нахилу застосовується переважно в конструкціях, орієнтованих на максимальне накриття корисної площі із збереженням достатнього рівня генерації електроенергії.

На рис. 1 представлено структурну схему гібридної сонячної енергетичної системи, до якої входять фотоелектричні модулі, мережевий інвертор, акумуляторну батарею, дизель-генератор та централізовану електромережу. Така конфігурація дозволяє забезпечити безперервне енергопостачання споживача шляхом автоматичного балансування навантаження між різними джерелами енергії з урахуванням пріоритетності, доступності та режимів експлуатації. Система передбачає наявність контролерів, лічильників та засобів керування, що дозволяють здійснювати моніторинг та оптимізацію енергетичних потоків у реальному часі.

У даній енергетичній системі передбачено використання декількох перемикачів, що забезпечують безперебійне електропостачання споживача. Автоматизована система перемикання підключена до центральної енергомережі. За сприятливих умов основним джерелом електроенергії слугує сонячна електростанція. У разі припинення постачання електроенергії з центральної мережі, система автоматично переходить на живлення від акумульованої сонячної енергії, а після її вичерпання – на резервне електропостачання від автономного генератора.

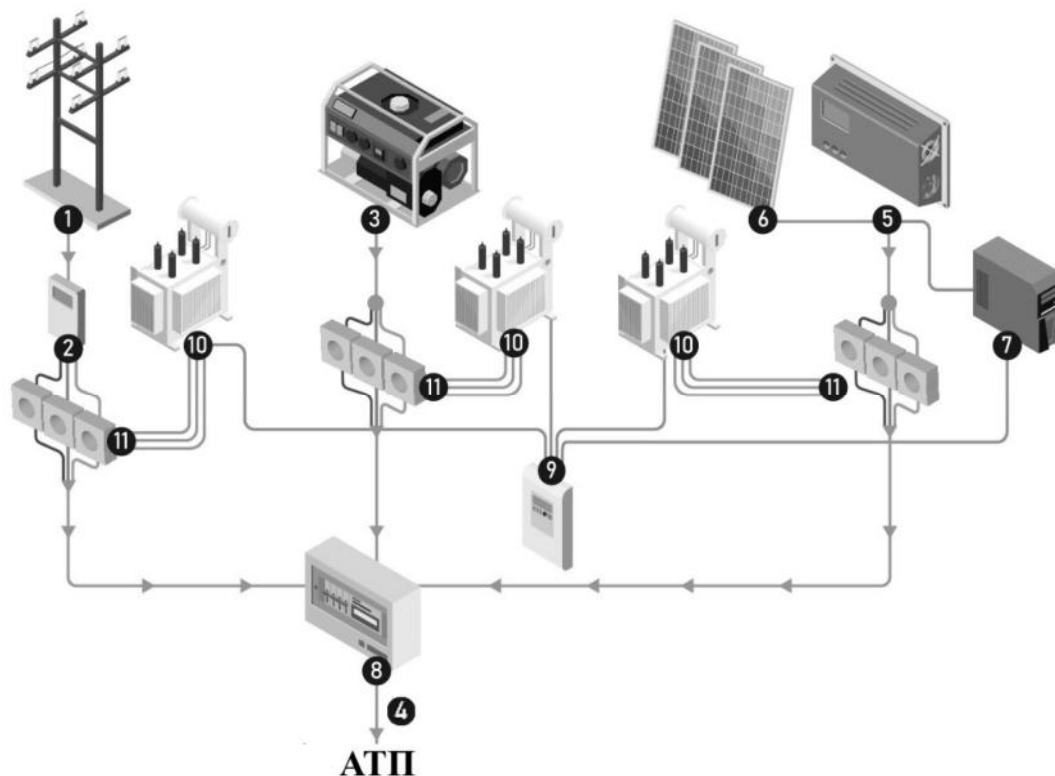


Рисунок 1 – Схема паралельної роботи мережевої сонячної електростанції (СЕС) та генератора:
1 – центральна мережа, 2 – лічильник (ввід від центральної мережі), 3 – генератор, 4 – АТП, 5 – інвертор,
6 – фотоелектричні модулі, 7 – система моніторингу інвертору, 8 – перемикач джерел енергії мережа-генератор (АВР – автоматичний ввід резерву), 9 – контролер управління (ENcombi ECcube2),
10 – лічильник (Meter Pilot SPM33), 11 – трансформатори струму

Джерело: розроблено на підставі [18]

Впровадження пропозицій енергоаудиторських рішень дозволяє комплексно підвищити енергоефективність автотранспортного підприємства за такими напрямками:

1. Зниження теплових втрат будівель досягається за рахунок виявлення конструктивних недоліків огорожувальних елементів за допомогою діагностичного обладнання (зокрема, інфрачервоної термографії) та їх подальшого усунення.

2. Оптимізація енергоспоживання технологічного обладнання здійснюється шляхом впровадження автоматизованої системи моніторингу й контролю за споживанням енергії. Така система передбачає інтеграцію з електролічильниками і спеціалізованим програмним забезпеченням для відстеження енерговитрат по котельнях, компресорах, технологічних лініях тощо.

3. Встановлення нормативів енергоспоживання для модернізованого обладнання в поєднанні з впровадженням системи мотивації персоналу до енергозбереження сприятиме формуванню культури раціонального використання ресурсів на АТП.

4. Підвищення енергоефективності систем освітлення включає визначення необхідної світловіддачі ламп, впровадження гнучкого керування освітленням, оптимального використання природного світла (у т.ч. через забезпечення чистоти світлопрозорих огорожень).

5. Скорочення водоспоживання досягається шляхом встановлення душових пристроїв з ручним регулюванням потоку води та аераційних насадок на змішувачі, що забезпечує зниження витрат без погіршення комфорту користування.

6. Підвищення автономності теплозабезпечення можливе шляхом впровадження альтернативних джерел тепла, зокрема твердопаливних котлів (пелетних і піролізних), які забезпечують тривале горіння та можуть використовуватись як для опалення, так і для гарячого водопостачання з автоматичним регулюванням температури.

Пелетні котельні, як правило, оснащуються автоматизованими системами подачі палива й повітря, що забезпечує ефективне згоряння. Піролізні котли працюють за двоступеневим принципом спалювання деревини з утворенням піролізного газу, що згорає в окремій камері, забезпечуючи ККД до 93% і низький рівень викидів. Вони сумісні з дровами, брикетами та пелетами за вологості не вище 25%, а завдяки вогнетривким матеріалам і автоматичному очищенню теплообмінника мають тривалий ресурс і високу надійність. Для зниження впливу на довкілля застосовуються рукавні фільтри для очищення димових газів.

7. Для отримання теплової енергії запропоновано використовувати всесезонний трубчастий вакуумний колектор закритого типу з насосною станцією. Його ККД становить 95 %. Має високу продуктивність за умов низької інсоляції, що забезпечує збір енергії сонця незалежно від погодних умов. Однак, в зимовий період потребу в гарячій воді АТП, задовільнити трубчастий вакуумний колектор не зможе. Його можна буде використовувати тільки як систему попереднього нагріву.

Висновки. Комплексне впровадження енергоаудиторських пропозицій на АТП сприяє істотному підвищенню їх енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат та зміцненню енергетичної автономності. За рахунок виявлення та усунення теплових втрат, автоматизації контролю енергоспоживання, модернізації систем освітлення і водопостачання, а також використання альтернативних джерел тепла (твердопаливні котли, сонячні колектори, СЕС), підприємства можуть досягти стійкої та екологічно збалансованої експлуатації. Такий підхід дозволяє не лише зменшити залежність від централізованих енергетичних джерел, але й створює основу для розвитку інноваційної енергетичної інфраструктури в умовах сучасних викликів.

АТП мають значний потенціал для впровадження СЕС у вигляді стаціонарних сонячних навісів і електростанцій на їх території. Це сприяє зниженню витрат на енергію, підвищенню екологічної діяльності та створенню комфортних умов для зберігання та обслуговування автотранспорту.

В подальшому планується детально розглянути методи покращення енергоефективності систем освітлення АТП.

Список літератури

1. Sverdlova A. Review of the current state and development perspectives of the solar energy in Ukraine. *System Research in Energy*. 2022. Vol. 1(70). P. 19–28. DOI: <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/568>.
2. Sabishchenko O., Rebilas R., Sczygiol N., Urbanski M. Ukraine Energy Sector Management Using Hybrid Renewable Energy Systems. *Energies*. 2020. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13071776>.

3. Hossain M. F. Implementation of hybrid wind and solar energy in the transportation sector to mitigate global energy and environmental vulnerability. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2023. Vol. 25. P. 1195–1210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02437-4>.
4. Balaras C. A., Argiriou A. A. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*. 2002. Vol. 34, № 2. P. 171–183.
5. Fokaides P. A., Kalogirou S. A. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*. 2011. Vol. 88, № 12. P. 4358–4365.
6. Lucchi E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3077–3090.
7. Енергетична стратегія України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України : веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text> (дата звернення: 01.05.2025).
8. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України : веб-сайт. URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80 (дата звернення: 01.05.2025).
9. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV. Законодавство України : веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15> (дата звернення: 01.05.2025).
10. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель [Чинний від 01.09.2022]. Київ, 2022. 27 с.
11. ДСТУ EN ISO 6781-3:2022. Ефективність будівель. Виявлення нерівномірності тепла, повітря та вологи в будівлях інфрачервоними методами. Частина 3. Кваліфікація операторів обладнання, аналітиків даних і авторів звітів (EN ISO 6781-3:2015, IDT; ISO 6781-3:2015, IDT) [Чинний від 31.12.2023]. Київ, 2022. 28 с.
12. Дьяченко О. С. Інвестиції в сонячну енергетику в децентралізованій енергосистемі як чинник зміцнення енергетичної безпеки України під час війни. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 2. С. 73–78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\)73-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)73-78).
13. *Trends in Photovoltaic Applications 2023*. International Energy Agency : веб-сайт. URL: https://iea-rpvs.org/trends_reports/trends-2023/ (дата звернення: 01.05.2025).
14. *Sustainable and Smart Mobility Strategy*. European Commission : веб-сайт. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/659455/EPRS_BRI\(2021\)659455_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/659455/EPRS_BRI(2021)659455_EN.pdf) (дата звернення: 01.05.2025).
15. Kocsis D., Judit T. K., Istvan W. A. Evaluating battery electric vehicle usage in the EU: A comparative study based on member state energy mixes. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30655>.
16. Nishant Varshney. Transportation Applications of Solar Energy: Innovations and Consequences. *International Journal of Environmental Noise and Pollution Control*. 2023. Vol. 1, Issue 2. P. 39–44. DOI: <https://journals.stmjournals.com/ijenpc>.
17. ДБН В.2.3-15:2007. Автостоянки і гаражі для легкових автомобілів (із зміною № 1, зміною № 2 та зміною № 3) [Чинний від 31.01.2022]. Київ, 2022. 53 с.
18. Сонячні електростанції для бізнесу. *VoltEnergy* : веб-сайт. URL: <https://vseti220-24.com.ua> (дата звернення: 01.05.2025).

References

1. Sverdlova, A. (2022). Review of the current state and development perspectives of solar energy in Ukraine. *System Research in Energy*, 1(70), 19–28. systemre.org/index.php/journal/article/view/568 [in Ukrainian].
2. Sabishchenko, O., Rebilas, R., Sczygiol, N., & Urbanski, M. (2020). Ukraine energy sector management using hybrid renewable energy systems. *Energies*, 13, 1776. <https://doi.org/10.3390/en13071776>.
3. Hossain, M. F. (2023). Implementation of hybrid wind and solar energy in the transportation sector to mitigate global energy and environmental vulnerability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25, 1195–1210. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02437-4>.
4. Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34(2), 171–183. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0).
5. Fokaides, P. A., & Kalogirou, S. A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88(12), 4358–4365. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.042>.
6. Lucchi, E. (2018). Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3077–3090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>.
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). *Energy strategy of Ukraine until 2050*. Retrieved May 1, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text> [in Ukrainian].
8. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. (2017). *National plan for reducing emissions from large combustion plants*. Retrieved May 1, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-p> [in Ukrainian].

9. Verkhovna Rada of Ukraine. (2003). *Law of Ukraine "On Alternative Energy Sources" of February 20, 2003 No. 555-IV*. Retrieved May 1, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15> [in Ukrainian]
10. DBN V.2.6-31:2021. (2022). *Thermal insulation and energy efficiency of buildings* [Valid from September 1, 2022]. Kyiv. [in Ukrainian].
11. DSTU EN ISO 6781-3:2022. (2022). *Performance of buildings. Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods. Part 3: Qualification of equipment operators, data analysts and report authors (EN ISO 6781-3:2015, IDT; ISO 6781-3:2015, IDT)* [Valid from December 31, 2023]. Kyiv. [in Ukrainian].
12. Diachenko, O. S. (2024). Investments in solar energy in a decentralized power system as a factor of strengthening Ukraine's energy security during the war. *Renewable Energy*, 2, 73–78. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\)73-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)73-78) [in Ukrainian].
13. International Energy Agency. (2023). *Trends in Photovoltaic Applications 2023*. Retrieved May 1, 2025, from https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2023/
14. European Commission. (2021). *Sustainable and Smart Mobility Strategy*. Retrieved May 1, 2025, from [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/659455/EPRS_BRI\(2021\)659455_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/659455/EPRS_BRI(2021)659455_EN.pdf).
15. Kocsis, D., Judit, T. K., & Istvan, W. A. (2024). Evaluating battery electric vehicle usage in the EU: A comparative study based on member state energy mixes. *Heliyon*, 10, e30655. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30655>.
16. Varshney, N. (2023). Transportation applications of solar energy: Innovations and consequences. *International Journal of Environmental Noise and Pollution Control*, 1(2), 39–44. <https://journals.stmjournals.com/ijenpc>.
17. DBN V.2.3-15:2007. (2022). *Car parks and garages for passenger cars (with amendment No. 1, No. 2 and No. 3)* [Valid from January 31, 2022]. Kyiv. [in Ukrainian].
18. VoltEnergy. (2025). *Solar power plants for business*. Retrieved May 1, 2025, from <https://vseti220-24.com.ua> [in Ukrainian].

Alla Yovchenko, PhD tech. sc.

Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Integration of Solar Energy Systems into Motor Transport Enterprises to Ensure Energy Autonomy, Energy Efficiency and Environmental Friendliness

The need to increase energy efficiency and energy autonomy of motor transport enterprises in the conditions of the modern energy crisis caused by both armed aggression against Ukraine and global climate change is substantiated. The strategic importance of introducing renewable energy sources, in particular solar energy systems, to ensure the uninterrupted functioning of transport sector enterprises is highlighted. The design features of the use of solar canopies based on parking lots are analyzed, taking into account current building codes and requirements for the infrastructure of charging stations. It is established that the implementation of such solutions not only contributes to increasing energy sustainability, but also ensures a reduction in operating costs, an improvement in the environmental balance, and the adaptation of enterprises to modern challenges in the field of energy supply. The results obtained can be used in the development of motor transport enterprises modernization programs and the formation of regional strategies for the development of sustainable mobility. The prospects of using energy storage devices to increase the efficiency of photovoltaic systems during off-peak hours are noted. The feasibility of combining local RES solutions with digital energy monitoring and management systems to achieve maximum energy efficiency is emphasized.

By identifying and eliminating heat losses, automating energy consumption control, modernizing lighting and water supply systems, and using alternative heat sources (solid fuel boilers, solar collectors), enterprises can achieve sustainable and environmentally balanced operation. This approach not only reduces dependence on centralized energy sources, but also creates the basis for the development of innovative energy infrastructure in the face of modern challenges.

motor transport enterprise, energy autonomy, solar energy systems, energy efficiency, renewable energy sources

Одержано (Received) 07.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

УДК 621.43:662.767:620.193 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.383-391](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.383-391)Д. О. Шалапко¹, доц., канд. техн. наук, Я. І. Тарандушка^{2,3}¹Херсонський навчально-науковий інститут національного університету
кораблебудування, м. Херсон Україна²Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна³Університет Жиліни, Жиліна, Словацька Республіка

e-mail: shalapko.denys@gmail.com, yan453620@gmail.com

Оцінка впливу водневих добавок на довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння

У статті досліджено вплив водневих добавок на експлуатаційні характеристики, довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Проведено літературний огляд сучасних досліджень щодо ефективності згоряння, викидів шкідливих речовин та продуктивності двигунів при використанні водню як добавки до традиційних палив. Подано результати експериментальних досліджень з аналізом змін температурних режимів, зносу деталей, впливу водневої крихкості та підвищеного вмісту вологи на мастильні матеріали. Обґрунтовано технічні виклики та перспективи широкого впровадження водневих технологій у транспорті. Зроблено висновки щодо необхідності розробки нових матеріалів, систем охолодження та мастил для забезпечення тривалого ресурсу роботи ДВЗ з водневими добавками.

водень, двигун внутрішнього згоряння, воднева крихкість, знос, довговічність, надійність, викиди, ефективність згоряння

Постановка проблеми. Сучасний розвиток автомобільного транспорту супроводжується посиленням екологічних вимог і зростаючою необхідністю підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Незважаючи на активну електрифікацію галузі, ДВЗ залишаються основним джерелом приводу для більшості транспортних засобів, особливо у важкому та комерційному транспорті. Одним із перспективних напрямів зниження екологічного навантаження є використання водню як паливної добавки до традиційних видів палива [1].

Водень привертає увагу завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям: високій теплотворній здатності, широкому діапазону займистості (4–75% у повітрі) та високій швидкості поширення полум'я (до 2,65 м/с), що сприяє повнішому та стабільнішому згорянню суміші [2]. Крім того, при його згорянні утворюється лише водяна пара, що знижує рівень викидів вуглекислого газу (CO₂), оксиду вуглецю (CO) і вуглеводнів (HC) [3].

Застосування водню в ДВЗ не лише підвищує ефективність процесу згоряння, а й дозволяє адаптувати існуючі паливні системи до майбутніх екологічних стандартів без необхідності повної заміни інфраструктури [4]. Це робить технологію водневих добавок особливо актуальною в умовах переходу до низьковуглецевих джерел енергії та «зеленого» транспорту [5].

Однак, разом із перевагами використання водню, виникають і технічні виклики. Серед них — підвищення температури згоряння (до 2500–3000 К), що може спричинити термічну втому компонентів [6]; зміна режимів змащування через накопичення води в мастилах [3]; а також явище водневої крихкості, особливо небезпечне для сталевих компонентів, які зазнають циклічних навантажень [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея використання водню як палива або паливної добавки в двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) бере початок із середини ХХ століття. У 1970-х роках, на тлі нафтової кризи, дослідники розпочали

активне вивчення можливостей використання водню для покращення характеристик згоряння та зменшення залежності від викопного палива. Одним із перших технічних рішень стало створення бортового генератора водню для часткового впорскування в ДВЗ [9].

У 1980-х роках з'явилися системи електролізу для виробництва ННО-газу (суміші водню і кисню), що подавалися в камеру згоряння для покращення згоряння традиційних палив. Одним із піонерів у цій галузі був Юлл Браун, який запатентував метод виробництва горючого газу за допомогою електролізу.

Починаючи з 2000-х років, на тлі посилення екологічних вимог та активізації глобального порядку денного щодо скорочення викидів CO₂, інтерес до водневих технологій суттєво зріс. Розробки почали фокусуватися не лише на згорянні, а й на безпеці, довговічності та економічності використання водню в ДВЗ. Провідні виробники, зокрема Toyota та Cummins, розглядають водневі ДВЗ як потенційну перехідну технологію між традиційними ДВЗ та паливними елементами.

У сучасних дослідженнях основна увага приділяється ефективним методам подачі водню (портове та пряме впорскування), сумісності водню з іншими паливами (метанол, CNG, бензин), а також зменшенню негативного впливу, зокрема водневої крихкості [10].

Попередні наукові праці, присвячені впливу водню як добавки до традиційного палива в ДВЗ, зосереджені здебільшого на трьох ключових напрямках: ефективність згоряння, зміни у викидах шкідливих речовин та вплив на продуктивність двигуна.

Водень характеризується високою швидкістю поширення полум'я (до 2,65 м/с) та широким діапазоном концентрації займання в повітрі (4–75%), що сприяє повнішому і стабільнішому згорянню паливно-повітряної суміші, навіть за умов пісного сумішоутворення [11]. У дослідженні ArvinMeritor і MIT із застосуванням плазмового реформера, який виробляв водень на борту, зафіксовано зростання теплової ефективності бензинового двигуна на 20–30%. Експеримент з ННО-добавкою в бензиновий двигун Skoda Felicia 1.3 L показав підвищення гальмівної теплової ефективності на 10% при подачі ННО-газу зі швидкістю 0,5 л/хв. Подібне зростання пояснюється більш повним згорянням, стабільною фронтальною хвилею та покращеною турбулентністю в камері згоряння.

Водень має потенціал суттєвого зниження викидів CO і HC за рахунок більш повного згоряння. Наприклад, при портовому впорскуванні 3–6% водню у бензиновий двигун об'ємом 1,6 л було зафіксовано зменшення викидів CO на 20%, HC — на 30%, а також зниження NO_x на 15% за умов пісної суміші [12]. У випадку дизельних двигунів додавання водню у кількості 10–40 л/хв спричинило зниження CO та HC на 15–25%, залежно від режиму роботи. Водночас, за надмірної концентрації водню або за умов багатого сумішоутворення температура згоряння може значно зрости, що спричиняє зростання утворення NO_x [13].

Водневі добавки також позитивно впливають на продуктивність ДВЗ, зокрема на крутний момент і потужність. Дослідження на CNG-двигуні з воднем (у концентрації 5–20%) продемонструвало підвищення пікової потужності на 5–10% [10]. Це пов'язано із швидким і контрольованим процесом згоряння. Однак занадто велика частка водню у суміші (>20%) може спричинити передчасне займання або детонацію, що обмежує практичну концентрацію водню в паливі [15].

Систематизація результатів попередніх досліджень дозволяє виділити основні переваги та недоліки застосування водневих добавок у ДВЗ. У таблиці нижче наведено узагальнені висновки з наукових джерел щодо ефективності, викидів, надійності та експлуатаційних ризиків.

Таблиця 1 – Аналітичний аналіз дослідження

Аспект	Переваги	Недоліки
Екологічність	Зниження викидів CO до 20%, HC до 30%, сажі до 30%	Потенційне зростання NOx при високій частці водню (>10%)
Ефективність згоряння	Повніше згоряння, стабільність при пісному сумішоутворенні, ВТЕ зростає на 10–30%	Не спостерігається
Паливна економічність	Зменшення питомої витрати палива (до -4,34% при 5% H ₂ у метанол-бензині)	Не спостерігається
Температурні режими	-	Підвищення температур згоряння до 2500–3000 К → зростання термічних навантажень на поршні, клапани, головку циліндрів
Знос компонентів	-	Воднева крихкість (особливо клапани і сідла), підвищений знос трибопар через низьку змазувальну здатність
Корозія	-	Підвищення вологості в мастилі до 2%, емульгування мастила, пришвидшена корозія в системі змащення та вихлопі
Надійність роботи	Покращення стабільності роботи за рахунок швидкого згоряння	Ризик детонації та зворотного спалаху при H ₂ >10%, необхідність високоточної системи керування
Інфраструктурна сумісність	Можливість поступового переходу без радикальної зміни конструкції ДВЗ	Потреба у спеціальних мастилах, нових матеріалах, модернізованій системі охолодження

Джерело: розроблено авторами

У дослідженні було використано чотиритактні двигуни внутрішнього згоряння бензинового та дизельного типів, зокрема двигун типу 2Ч 13,5/14, що широко застосовується в судновій техніці. Двигуни працювали на базовому паливі з додаванням водню в різних концентраціях (від 5 до 20% за об'ємом). Подавання водню здійснювалось у впускний тракт через спеціально змонтовану систему з витратоміром та регулятором тиску, що дозволяло точно контролювати співвідношення компонентів паливної суміші.

Експерименти проводилися на моторному стенді з можливістю навантаження двигуна та реєстрації параметрів роботи. У процесі випробувань вимірювали гальмівну теплову ефективність, температуру згоряння, концентрацію шкідливих викидів (CO, HC, NO_x), а також вміст вологи у мастилі. Для оцінки зносу використовували періодичний візуальний огляд клапанного механізму та аналіз мастила на наявність металевих домішок. Кожен режим тестування тривав 100 годин, із проміжним контролем технічного стану через кожні 25 годин.

Отримані дані дозволили порівняти ефективність роботи двигуна без водневих добавок та з ними, а також оцінити довговічність окремих компонентів при тривалому впливі водню. Особлива увага приділялася стабільності згоряння, термічному навантаженню на деталі та зміні фізико-хімічних властивостей мастильних матеріалів. Надійність результатів забезпечувалася повторенням експериментів тричі з наступною статистичною обробкою.

Постановка завдання. Метою даної роботи є оцінка впливу водневих добавок на довговічність і надійність ДВЗ. Особливу увагу приділено впливу водню на знос

деталей двигуна, корозійні процеси, термічні навантаження та стабільність роботи. Дослідження спрямоване на виявлення критичних факторів, що обмежують довготривале використання водню, та обґрунтування шляхів підвищення ресурсу двигунів у таких умовах. Результати дослідження мають значення як для фундаментального розуміння механізмів деградації при використанні водню, так і для прикладної розробки конструктивних і матеріалознавчих рішень, спрямованих на підвищення ресурсу ДВЗ. В умовах глобальної декарбонізації транспорту водневі добавки можуть стати проміжним, але надзвичайно важливим етапом на шляху до екологічно сталого автотранспорту [8].

Виклад основного матеріалу. Дослідження показали, що додавання водню до паливної суміші сприяє значному підвищенню гальмівної теплової ефективності (ВТЕ) двигуна. При 10% об'ємному вмісті водню ВТЕ зростала з 35% (для базового палива) до 42%, а при 20% — до 45%, що наближає ефективність бензинового двигуна до дизельного рівня [16], [17]. Це пояснюється повнішим згорянням і покращеною турбулентністю суміші.

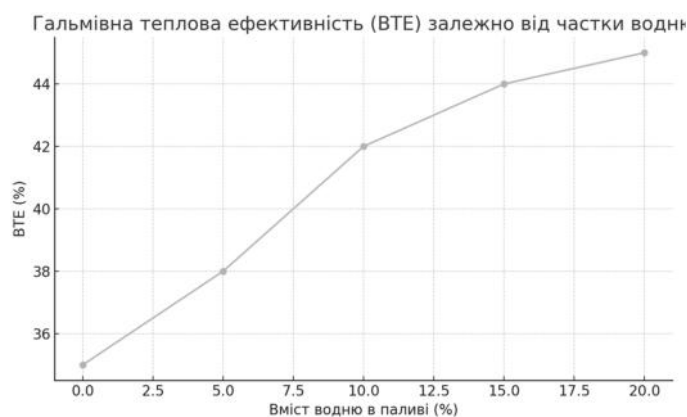


Рисунок 1 – Залежність гальмівної теплової ефективності (ВТЕ) від концентрації водню (% об.), (ось X: вміст водню, ось Y: ВТЕ, крива зростає з насиченням після 15%)

Джерело: розроблено авторами

Температура згоряння зростала пропорційно до частки водню в суміші: при 0% — близько 2250 К, при 10% — 2400 К, при 20% — до 2550 К. Таке підвищення температури може створювати додаткові термічні навантаження, що потребує модернізації системи охолодження та вибору термостійких матеріалів [14].

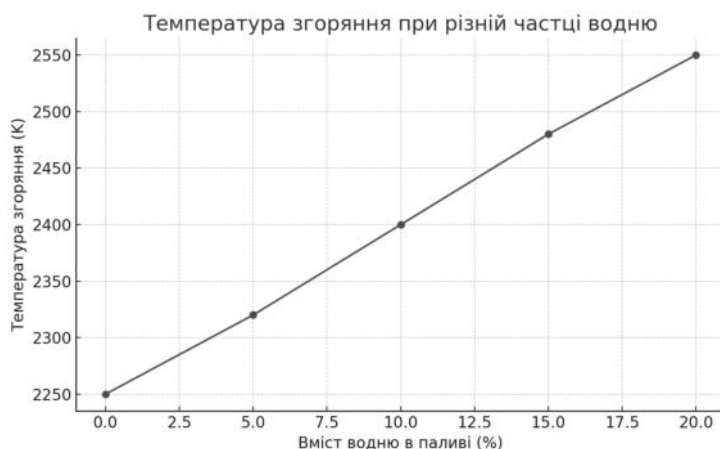


Рисунок 2 – Максимальна температура згоряння при різних об'ємних частках водню

Джерело: розроблено авторами

Викиди CO та HC зменшувалися зі зростанням концентрації водню. При 10% водню викиди CO знижувалися на 18–20%, HC — на 25–30%. Водночас спостерігалось незначне зростання викидів NO_x при концентраціях водню понад 15%, що пов'язано з високою температурою згоряння [2], [9], [14].

Таблиця 2 – Зміни у викидах шкідливих речовин при різних концентраціях водню

Вміст водню (%)	CO (г/кВт·год)	HC (г/кВт·год)	NO _x (г/кВт·год)
0	18.5	14.0	4.2
5	16.0	12.0	4.3
10	14.8	10.5	4.5
15	13.6	9.8	5.0
20	12.9	9.0	5.3

Джерело: розроблено авторами

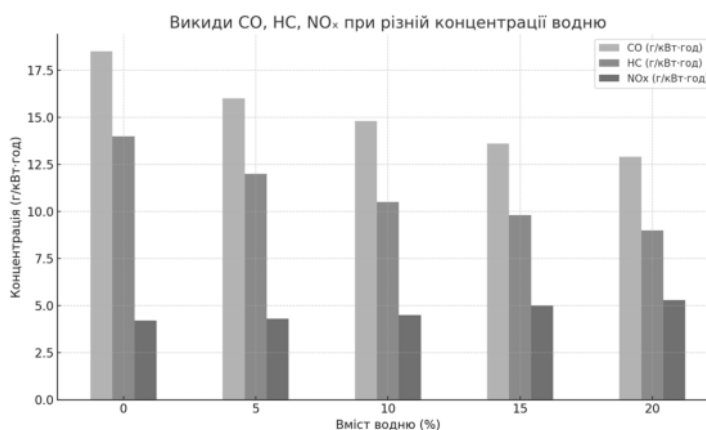


Рисунок 3 – Порівняння викидів CO, HC і NO_x при 0%, 10%, 20% водню

Джерело: розроблено авторами

Після 100 годин експлуатації з воднем у двигунах фіксувалося зростання зносу сідел і клапанів головки блоку циліндрів. Особливо вираженою була воднева крихкість впускних клапанів — спостерігались мікротріщини та зменшення твердості поверхневого шару [11]. Знос клапанів за 1000 годин експлуатації зріс з 0,1 мм (на бензині) до 0,25 мм при 20% водню.

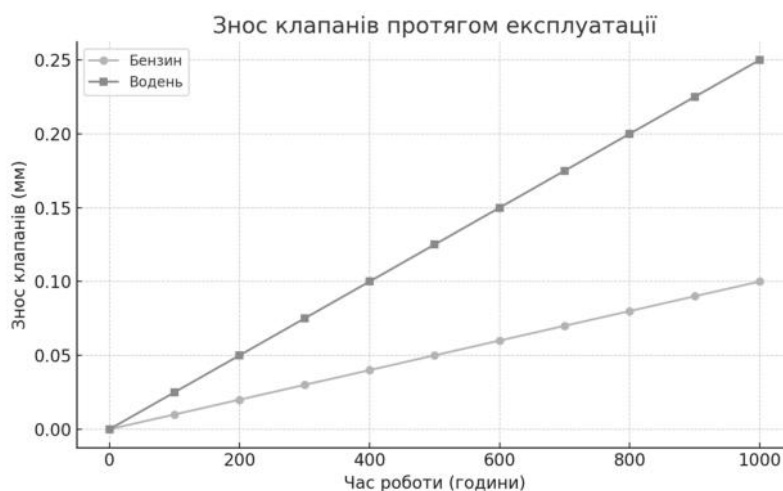


Рисунок 4 – Динаміка зносу клапанів протягом 1000 годин роботи

Джерело: розроблено авторами

У мастилі фіксувалося підвищення вмісту води: з 0,5% у звичайному режимі до 2% при роботі з воднем. Це призводило до зниження мастильної здатності та корозії поверхонь тертя, особливо в зоні поршневої групи [1], [3].

Таблиця 3 – Вміст води в мастилі та інтенсивність корозії

Вміст водню (%)	Вода в мастилі (%)	Інтенсивність корозії (умовні бали)
0	0.5	1
10	1.3	2
20	2.0	3

Джерело: розроблено авторами

Отримані експериментальні дані підтверджують значний вплив водневих добавок на робочі характеристики, довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння. Результати свідчать про наявність як істотних переваг, так і технічних обмежень, що мають бути враховані при розробці або адаптації двигунів до використання водню.

З точки зору ефективності, водень показав перевагу над традиційними паливами. Так, гальмівна теплова ефективність бензинового двигуна зросла з 35% до 45% при використанні 20% водню [3], [5]. Це наближає ефективність до дизельного рівня, що є суттєвим досягненням для двигунів з іскровим запалюванням. Крім того, зафіксоване зниження викидів CO і HC на 20–30% [2], [3], [9]. Однак, порівняно з традиційними паливами, водень спричиняє підвищення температур згоряння на 140–200 К [14], що потенційно призводить до прискореної деградації матеріалів у зонах з високим термічним навантаженням.

Довговічність двигуна при використанні водню потребує додаткової уваги. Виявлено прискорений знос клапанів та їх сідел, зокрема через водневу крихкість, що підтверджується появою мікротріщин і зниженням пластичності матеріалів [11]. У бензинових двигунах такі ефекти не фіксуються при традиційних режимах, що вказує на специфічну дію водню. Окрім цього, було зафіксовано зростання вмісту води у мастилі до 2% [3], що перевищує звичайні показники і спричиняє додаткову корозію компонентів системи змащення.

Використання водню у складі паливної суміші має низку переваг, таких як зменшення викидів CO/HC, підвищення ефективності згоряння, стабільна робота при пісних сумішах, а також можливість поступового впровадження без радикальної перебудови інфраструктури [8], [14]. Крім того, водень дозволяє зменшити навантаження на систему фільтрації твердих частинок, що важливо для дизельних двигунів [15].

До основних недоліків слід віднести:

- термічне навантаження на поршкову групу та головку циліндрів (через високу температуру згоряння),
- прискорений знос і воднева крихкість клапанного механізму [11],
- необхідність застосування спеціалізованих мастильних матеріалів, стійких до вологості та емульгування [1], [3],
- ризик передчасного займання або детонації при концентраціях водню >10% [16].

Результати експерименту дозволяють сформулювати низку ключових висновків:

1. Водневі добавки сприяють суттєвому підвищенню ефективності двигуна без зниження його потужності, особливо при концентрації до 15–20%.

2. Спостерігається виражене зниження викидів CO та HC, що робить технологію привабливою з екологічної точки зору.

3. Водночас виникають ризики для довговічності компонентів, зокрема клапанів, поршнів і системи змащення, що потребують нових технічних рішень — від підбору матеріалів до оптимізації конструкції та мастил.

4. У цілому, водневі добавки можуть розглядатись як перехідна технологія на шляху до повністю водневого або електричного транспорту. Проте для промислового впровадження потрібні додаткові дослідження з довготривалими тестами, а також створення нормативної бази та технологічної інфраструктури.

Висновки. У даній роботі проведено комплексну оцінку впливу водневих добавок на довговічність та надійність двигунів внутрішнього згоряння. На основі літературного аналізу, стендових експериментів та аналізу робочих процесів зроблено такі основні висновки:

1. Енергетична ефективність. Водень як добавка до традиційного палива (бензину або дизеля) сприяє підвищенню гальмівної теплової ефективності двигуна до 45%, що є суттєвим показником для двигунів з іскровим запалюванням. Це досягається завдяки високій швидкості полум'я, широкому діапазону займистості та покращеному змішуванню в камері згоряння [5], [6].

2. Екологічні переваги. Застосування водневих добавок забезпечує зниження викидів CO на 20%, HC на 30%, а у деяких режимах — і NO_x до 15%, що відповідає сучасним екологічним вимогам до транспорту [3], [9].

3. Проблеми довговічності. Основними обмеженнями є воднева крихкість клапанних механізмів, підвищений знос деталей та акумуляція вологи в мастилi, що зумовлює підвищену корозію. Встановлено зростання зносу впускних клапанів до 0,25 мм за 1000 годин роботи та підвищення вмісту води в мастилi до 2% [3], [11].

4. Надійність. Попри вказані обмеження, двигуни з водневими добавками демонструють задовільну стабільність роботи за умови дотримання оптимального співвідношення водню в паливній сумiшi (до 15%) і застосування відповідних технічних заходів (системи охолодження, мастила, керування запалюванням) [14], [16].

5. Практичні перспективи. Водневі добавки можуть стати ефективним проміжним рішенням на шляху до низьковуглецевої мобільності, особливо у важкому транспорті. Їх використання дозволяє адаптувати існуючі ДВЗ до сучасних вимог без кардинальних змін у конструкції або інфраструктурі [8].

У перспективі доцільно зосередитися на розробці нових матеріалів, стійких до водневої крихкості, вдосконаленні систем змащення та охолодження, а також стандартизації методик тривалих ресурсних випробувань воднево-модифікованих двигунів. Широке впровадження таких рішень сприятиме зниженню екологічного навантаження та забезпеченню стійкого розвитку транспортної галузі.

Список літератури

1. Bari S., Esmaeil M. M. Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*. 2010. Vol. 89, № 2. P. 378–383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.018>.
2. Bose P. K., Maji D. An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as induced fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, № 11. P. 4847–4854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.017>.
3. El-Kassaby M. M., Eldrainy Y. A., Khidr M. E., Khidr K. I. Hydroxy (HHO) gas addition affects gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*. 2016. Vol. 55, № 1. P. 243–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.02.019>.
4. Gong C., Li Z., Yi L., Liu F. Environmental and enviro-economic effect analysis of hydrogen-methanol-gasoline addition into an SI engine. *Fuel*. 2023. Vol. 345. Art. 128237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128237>.
5. Hydrogen-enhanced combustion engine could improve gasoline fuel economy by 20% to 30%. *Green Car Congress* : веб-сайт. 2005. 9 November. URL: www.greencarcongress.com/2005/11/hydrogenenhance.html (дата звернення: 10.06.2025).

6. Li Y., Wang S., Duan X. Effects of hydrogen addition on the durability of internal combustion engine components. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. Art. 127845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>.
7. San Marchi C., Somerday B. P. Technical reference for hydrogen compatibility of materials. *Sandia National Laboratories*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.2172/1048362>.
8. Saravanan N., Nagarajan G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33, № 6. P. 1769–1775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.027>.
9. Verhelst S., Wallner T., Eichlseder H. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019. Vol. 35, № 6. P. 490–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100713>.
10. Wang S., Ji C., Zhang B. Effect of hydrogen addition on the performance of a spark ignition engine fueled with methanol-gasoline blends. *Energy*. 2023. Vol. 262. Art. 125456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125456>.
11. White C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006. Vol. 31, № 10. P. 1292–1305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>.
12. Shalapko D. Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*. 2023. Vol. 18, № 4. P. 135–146. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>.
13. Kukhareno O., Shalapko D., Tarandushka L. Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Vol. 9, № 40. P. 164–174. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.164-174).
14. Shalapko D., Pyrysunko M., Radchenko R., Kornienko V. Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII*. Springer Nature Switzerland, 2024. P. 314–323. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27.
15. Shalapko D. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2024. Vol. 72, № 2. Art. 148837. DOI: <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>.
16. Shalapko D. O. Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Collection of Scientific Publications NUS*. 2021. № 4. P. 14–19. DOI: [https://doi.org/10.15589/znz2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znz2021.4(487).3).
17. Шалапко Д. О. Дослідження ефектів хвилюваних коливань в паливній апаратурі дизельного двигуна із застосуванням водневих добавок. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2021. № 3(486). С. 40–47.

References

1. Bari, S., & Esmaeil, M. M. (2010). Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89(2), 378–383. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.018>
2. Bose, P. K., & Maji, D. (2009). An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 4847–4854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.017>
3. El-Kassaby, M. M., Eldrainy, Y. A., Khidr, M. E., & Khidr, K. I. (2016). Hydroxy (HHO) gas addition affects gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.02.019>
4. Gong, C., Li, Z., Yi, L., & Liu, F. (2023). Environmental and enviro-economic effect analysis of hydrogen-methanol-gasoline addition into an SI engine. *Fuel*, 345, 128237. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128237>
5. Green Car Congress. (2005, November 9). Hydrogen-enhanced combustion engine could improve gasoline fuel economy by 20% to 30%. Retrieved June 10, 2025, from www.greencarcongress.com/2005/11/hydrogenenhance.html
6. Li, Y., Wang, S., & Duan, X. (2021). Effects of hydrogen addition on the durability of internal combustion engine components. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>
7. San Marchi, C., & Somerday, B. P. (2012). *Technical reference for hydrogen compatibility of materials*. Sandia National Laboratories. <https://doi.org/10.2172/1048362>
8. Saravanan, N., & Nagarajan, G. (2008). An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(6), 1769–1775. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.027>

9. Verhelst, S., Wallner, T., & Eichlseder, H. (2019). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100713>
10. Wang, S., Ji, C., & Zhang, B. (2023). Effect of hydrogen addition on the performance of a spark ignition engine fueled with methanol-gasoline blends. *Energy*, 262, 125456. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125456>
11. White, C. M., Steeper, R. R., & Lutz, A. E. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(10), 1292–1305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
12. Shalapko, D. (2023). Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*, 18(4), 135–146. <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>
13. Kukharenko, O., Shalapko, D., & Tarandushka, L. (2024). Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40), 164–174. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.164-174)
14. Shalapko, D., Pyrysunko, M., Radchenko, R., & Kornienko, V. (2024). Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII* (pp. 314–323). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27
15. Shalapko, D. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 72(2), 148837. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
16. Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Collection of Scientific Publications NUS*, 4, 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3)
17. Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the effects of wave oscillations in the fuel equipment of a diesel engine using hydrogen additives. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 3(486), 40–47. [in Ukrainian].

Denys Shalapko¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yan Tarandushka**^{2,3}

¹*Kherson Faculty, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine*

²*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

³*University of Zilina, Zilina, Slovak Republic*

Assessment of Hydrogen Additives Impact on the Durability and Reliability of Internal Combustion Engines

This article presents a comprehensive assessment of the effects of hydrogen additives on internal combustion engines' durability and operational reliability (ICEs). In the context of the global energy transition and the need for decarbonization of the transport sector, hydrogen is considered a highly promising supplemental fuel due to its fast flame speed, broad flammability limits, and environmentally benign combustion products. When used as an additive to conventional fuels such as gasoline or diesel, hydrogen has the potential to reduce pollutant emissions, improve fuel economy, and enhance engine thermal efficiency.

The study integrates an in-depth review of the scientific literature with original experimental results obtained using a four-stroke diesel engine, in which hydrogen was introduced into the intake manifold at concentrations ranging from 5% to 20% by volume. The findings indicate that hydrogen enrichment enhances brake thermal efficiency (BTE) by up to 10% compared to baseline conditions. Moreover, a substantial reduction in carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions was observed. However, the rise in combustion temperature led to additional thermal stress on engine components, particularly valve seats, cylinder head areas, and piston rings. Signs of hydrogen embrittlement were also recorded, and increased moisture content in lubricants, reaching up to 2%, which promoted corrosion of metallic elements.

Despite these challenges, hydrogen-modified engines demonstrated stable performance throughout the 1000-hour test cycle. Nonetheless, maintenance intervals for critical components such as the valve train were reduced, underscoring the necessity of improved materials and lubricant formulations. It is concluded that hydrogen additives can provide an effective interim strategy for enhancing ICE performance, but further investigation into long-term mechanical and chemical impacts is essential.

hydrogen, internal combustion engine, hydrogen embrittlement, wear, durability, reliability, emissions, combustion efficiency

Одержано (Received) 20.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

UDC 629.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.392-399](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.392-399)

Ihor Shlonychak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maksym Rud**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Cherkassy state technological university, Cherkassy, Ukraine
e-mail: Igor_Shlonychak@ukr.net, hochspannung77@gmail.com

Possible Progressive Ways of Recycling Car Tires

The increase in the number of manufactured products causes an increase in production waste. The problem of excess production waste in Ukraine is acute. One of the most environmentally harmful entities that pollute the environment is rubber products. The list of products made from rubber is large: insulation for wires, gloves, household items, shoes and, of course, tires. The purpose of the article is to research of the possible methods of recycling automobile tires and establish the most rational method from the point of view of modern innovative methods of tire recycling.

One of the most common rubber products is tires. The composition of modern tires is a mixture of various components: additives, fillers, plasticizers and other special additives. The constant increase in waste tires is a problem worldwide. Since rubber is highly resistant to environmental factors, the accumulation of large volumes of used tires creates a serious environmental problem. Modern and innovative technologies for recycling used tires will help solve it. There are a number of different methods for recycling car tires. Therefore, the research presents various methods of recycling automobile tires. Particular attention was paid to modern methods. There are a number of different methods for recycling car tires. One of the common methods of recycling tires is energy recovery. Statistical data show that shredding used tires is also one of the modern methods of recycling them.

Studies using an analytical method of collecting information have established the harmful effects of landfills of used automobile tires. In this regard, the issue of tire recycling in the world is becoming extremely acute. The same situation is observed in Ukraine. The article draws conclusions about the most common methods of recycling car tires. The main methods of recycling car tires are based on the recovery of the energy that was spent on their production.

worn car tires, methods of recycling rubber crumb, pyrolysis, microbiological processes of tire recycling, energy recovery, environmental pollution, rubber products

Problem statement. The increase in the number of manufactured products causes an increase in production waste. The problem of excess production waste in Ukraine is acute. One of the most environmentally harmful entities that pollute the environment is rubber products. The list of products made from rubber is large: insulation for wires, gloves, household items, shoes and, of course, tires. With the growth of the automotive industry, the need for consumption of automobile tires is increasing.

Rubber products include a large number of items that can be used in various areas of human activity: insulation for wires, rubber gloves, hoses, tires and much more. Rubber products differ in their manufacturing methods and application. However, all such products have one common property - they contain a hydrophobic and elastic elastomer - rubber, which is vulcanized to obtain rubber. The basis of rubber production is the process of vulcanization. This is a technological process in which plastic or "raw" rubber is converted into rubber. The essence of vulcanization is the combination of linear macromolecules of rubber into a single system - a vulcanized network, using sulfur compounds [1].

One of the most common rubber products is tires. The composition of modern tires is a mixture of various components: additives, fillers, plasticizers and other special additives. The exact quantitative and qualitative composition of rubber for a particular brand of tire is a trade secret, but it is possible to determine the main set of components.

The constant increase in waste tires is a problem worldwide. Their uncontrolled burning leads to atmospheric pollution with soot, carbon monoxide, cyanide compounds, and dioxides. Since rubber is highly resistant to environmental factors, the accumulation of large

volumes of used tires creates a serious environmental problem. Modern and innovative technologies for recycling used tires will help solve it. There are a number of different methods for recycling car tires.

Analysis of recent research and publications. The author of the article [2] notes that countries such as Turkey, Great Britain, Japan, the USA, Switzerland and many others reuse 95% of tires. The areas of utilization are different. For example, worn tires are used in civil construction, in energy recovery, etc. In addition, the author of the article notes that only 10 to 20% of waste tires are properly stored or reused. The rest remains exposed to the environment. As a result, the environment has suffered serious damage, causing health problems. The author of the work poses a real, alarming problem for humanity, which urgently needs to be solved by applying the latest methods of recycling automobile tires. This is a well-known problem related to the constant growth of the automotive industry, polluting the environment with unused tires. The author cites alarming statistics, namely: 1.4 billion tires are thrown into the environment every year. Despite the fact that the number of used tires increases annually by 13% from 300 million in 2016 to more than 1,300 million in 2020.

The author [2] describes different types of routes and types of vehicles whose tires had corresponding wear during operation. For the selection of the routes, priority was given to minimizing travel distances and collection time, and reducing the costs related to tire transportation, for which it was proposed to use three collection routes: a heavy transport vehicle with a capacity of 1.5 Ton to collect 210 tires per trip, and a total of 2 trips per route/week would collect 5040 tires per month. The details and characteristics of each route are shown in Figure 1.

Route	Distance Traveled (km) per Month	Number of Tours per Month	Number of Tires Collected	Approximate Weight (kg)
1	128	8	1320	10,560
2	168	8	1750	14,000
3	120	8	1970	15,760
Total	416	24	5040	40,320

Figure 1 – Comparison of the number of tires used on different routes

Source: developed by the authors [2]

Government and private representatives are interested in exploring new markets for recycled tire rubber. Rubber products are widely used as raw materials for processing into finished parts or semi-finished products with wide industrial applications. The author notes that such rubber is used in agricultural, recreational and sporting goods. In particular, the article notes that tire rubber can be used as boat protection, conveyor belts, vibration reduction on railway tracks, footwear industry, lawns and playground flooring [2].

The author [3] of the scientific research notes that rubbers that are not biodegradable can be used in rubber and technical products. Accordingly, tires made from such rubber cannot be easily recycled. Therefore, all this leads to certain difficulties with the disposal of such rubber products after their production and use.

European tire manufacturers provide approximately 65% of the total production of rubber products specifically for the automotive sector. The author notes that tires account for 3.5% of the mass of rubber and technical products for cars. All other types of rubber products account for only 1.6%. This suggests that end-of-life tires occupy a major place among rubber waste. Thus, the author emphasizes that by 2030 the number of used tires entering the environment will increase to 1,200 million tires per year [3].

The author [3] emphasizes that one of the common methods of recycling tires is energy recovery. The scientist notes that tires are used as an alternative fuel in cement kilns, paper mills or power plants. The article gives examples of European Union countries, in particular Norway, Serbia, Switzerland. It is in these countries that 91% of waste tires were properly disposed of by recycling materials (56.4%) or energy recovery (34.9%).

Statement of the task. The purpose of the article is to research of the possible methods of recycling automobile tires and establish the most rational method from the point of view of modern innovative methods of tire recycling.

Presentation of the main material. Today, in the leading countries of the world, no more than 20% of used cars are recycled from raw materials each year, but the growth of the car fleet is 3-7% per year. As you know, used tires can be buried or recycled. Therefore, a number of problems arise with the accumulation of waste tires. It is necessary to note that tire landfills are impractical and should be completely eliminated in the future. Therefore, the analysis of modern methods of recycling automobile tires is an urgent task of our time.

ETRMA statistics show that the processing of rubber and technical materials is mostly the shredding of waste tires. For example, in 2018 this method of tire recycling was the most popular method among various methods. This method is based on the production of chips, which are used as an alternative fuel. This approach allows you to recover the energy consumed [3].

The car shows data (Figure 2), which were collected from various studies. Over the past decades, research on tire recycling methods has been relevant and constantly developing. That is, the number of positions is distributed as follows: rubber recycling - 15779, ground tire rubber - 4986, devulcanization - 1001.

Known methods of recycling and using waste tires can be divided into 5 groups according to the nature of the waste [4]:

- types of use of unused tires without changing their size and shape;
- a way to complete the destruction of the primary treatment system;
- methods that damage deep waste;
- methods that lead to significant changes in the nature of drugs, due to the transfer of elastic wood to products with plastic properties (production regeneration);
- methods that do not significantly change the melting of the drug (production of rubber crumb).

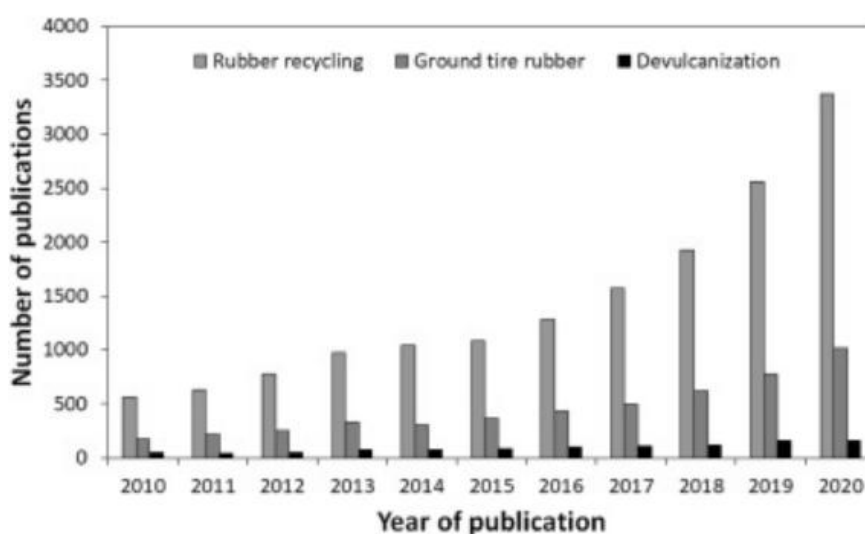


Figure 2 – Development of scientific research on tire recycling methods

Source: developed by the authors [3]

Whole tires can be used in hydraulic engineering, as reefs (spreading platforms), to protect slopes from erosion, as sound barriers, floating water and cracks. The Georgia Institute of Hydraulics and Reclamation has developed various projects for edge protection and hydraulic structures using used tires. This is a tool for protecting slopes from erosion [5], things are done with half-wheels.

In the USA, Australia, Japan, New Zealand and some other countries, hundreds of artificial spawning grounds have been created from canals used to increase marine bioproductivity [6]. The main advantages of such spawning grounds are that the seawater is unpolluted and very stable. According to some reports, the longevity of tires in the sea is 150-200 years. Therefore, breakwaters are made from tires. However, they have serious drawbacks: they do not work in strong waves and are difficult to maintain. To protect the slope from erosion, it is covered with tires, covered with soil and planted with grass [6].

To illustrate the reuse of rubber, the author successfully compares the crumb rubber market. Figure 3 shows that rubber crumb is quite widely used in various areas of human life.

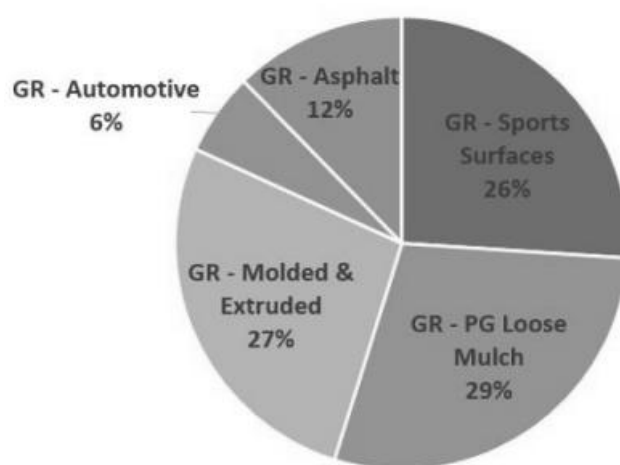


Figure 3 – Development of scientific research on tire recycling methods

Source: developed by the authors [6]

The design of noise barriers was developed by the company "Organicon" (Germany) on highways. One side is opened by the side of the tire, which is then compacted and filled with soil. The result is a slope from this structure that does not subside. In this case, the consumption of tires is 5000 per 100 m of wall length. Concrete blocks are used for the construction of roads with soft peat soils [4].

Worn tires can be used to build bridges over small rivers using concrete, streams, canals, lay pipelines under roads and railways, and build fences. These buildings are durable and the cost of construction is much lower than similar concrete buildings. The demand for tires used in engineering works ranges from a few thousand to tens of thousands of tons per year, depending on the size of the country and the scale of its business [5].

Destruction of tires by high temperatures is one of the common methods of tire disposal. Production of thermal destruction of tires containing valuable mineral oil is also quite widespread. This releases dissolved rubber, hydrocarbon condensate, gases and metals. Depending on the production conditions, such emissions can be used as raw materials for waterproofing materials, production of mastics, petrochemicals, boiler and furnace fuel, bitumen [7].

The author of article [8] presents various methods of recycling automobile tires. Figure 4 shows the mentioned tire recycling methods. The author presents a very detailed comparison of the main tire recycling methods.

Criteria	Recycling method					
	Tire recycling into reclaim	Tire recycling into crumb	Microwave pyrolysis	Classic pyrolysis	Gasification	Incineration
Further processing of processed products for sale	Necessary	Necessary	Not necessary	Not necessary	Necessary	No
Recycling of processed products after the end of their service life	Necessary	Necessary	No	No	No	No
Industrial experience	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Processing speed	Low	Low	High	Medium	High	-
Environmental factors	Rubber crumb dust, organic oil, inorganic salt	Rubber crumb dust	Carbon dioxide	Carbon dioxide	Carbon dioxide, carbon monoxide	Sulfur oxide, aromatic hydrocarbon, condensed aromatic hydrocarbon, chlorine derivatives, etc.

Figure 4 – Development of scientific research on tire recycling methods

Source: developed by the authors [8]

The author of the article effectively shows various methods of recycling car tires. Table 1 shows various methods of recycling car tires, clearly showing the advantages and disadvantages of each recycling method.

Much attention in the issue of tire recycling is attracted by the use of such tires in polymer practice and composite materials. This method of tire recycling allows for the sustainable development of industrial technologies for recycling waste tires. Therefore, the use of tires as a filler for polymer composites is quite successful in reducing material costs [9].

The production of liquid and gaseous hydrocarbons, as well as carbon-rich solid materials, is achieved by the pyrolysis of rubber products. Pyrolysis is considered a progressive modern method of recycling used tires. It is a method that allows the deconstruction of polymers [9].

The explosion-circulation method of tire recycling, in comparison with others, is based on a fundamental replacement of the destruction method from the traditional mechanical to explosive with circulation of the explosion product. And the explosion, as is known, is the strongest and cheapest destroyer in nature. Without a doubt, this technology has made it possible to make a breakthrough in the field of tire recycling [10-11].

The cryogenic method is created by first freezing the tires and then destroying them. Due to freezing, the process of destruction and separation of the metal cord is simplified. This technology is widespread in the USA, and the rubber powder obtained in this way is called cryorubber [10].

Physico-chemical methods of tire recycling. Dissolution in an organic solvent is a process of thermal liquefaction of waste when starting in an organic solvent at a temperature of 280-435 oC and a pressure of at least 6.1 MPa, separation of the weak fraction into a fraction with a boiling point above 220 oC. With this liquid fraction with a boiling point up to 220 oC, catalytic reforming is provided, and part of the weak fraction is then used as the target product, and part is selected as a solvent with a new portion of waste [10].

Another method of recycling car tires is the so-called "ozone knife". Destruction of tires with ozone (the "ozone knife" technology) is based on the destruction of rubber by background ozone, which is contained in the atmosphere [10].

In addition, the method of tire recycling, which is based on microbiological processes, is of particular interest. Microbiological methods of tire disposal. One of the methods of tire disposal is microbiological, namely the destruction of solid tires by microscopic fungi [10-11].

Table 1 - Methods of recycling car tires

Recycling method	Process description	Environmental impact	Advantages
Mechanical recycling	Shredding, grinding, and separating rubber, steel, and fibers to produce crumb rubber	Low emissions; minor dust generation and waste fiber.	Simple, cost-effective, scalable
Ambient grinding	Grinding at or above room temperature	Low emissions; some heat generation.	Does not require cryogenic facilities.
Cryogenic grinding	Rubber is embrittled using liquid nitrogen before grinding	Safe, clean; energy-intensive due to cryogen.	Produces fine, clean rubber particles.
Pyrolysis	Thermal decomposition in absence of oxygen yielding oil, gas, and char.	VOCs, CO ₂ , potential toxicants unless cleaned.	Recovers energy and oil; scalable
Gasification	Partial oxidation to convert tires into syngas.	Can be clean if controlled; ash disposal needed.	High-value syngas for energy or synthesis
Chemical devulcanization	Breaks sulfur cross-links using chemical agents.	Reagents may be hazardous; controllable if optimized.	Enables reuse of rubber compounds
Microwave devulcanization	Uses microwave radiation to selectively heat and devulcanize rubber.	Lower emissions; no chemicals; shielding required.	Energy efficient and selective.
Ultrasound devulcanization	Applies high-frequency sound waves to induce devulcanization.	Clean method; less mature commercially	Improved control; minimal chemical use.
Solvolysis	Uses solvents to depolymerize rubber into monomers or oils.	Solvent disposal/reuse challenges; less CO ₂ emission	Potential for selective recovery.
Hydrothermal liquefaction	Converts tires into oil using water under supercritical/subcritical conditions.	Clean if properly managed; by-product water/chemicals.	Good oil yield; minimal external solvent.
Microwave pyrolysis	Selective rubber heating via microwaves in inert atmosphere.	Lower emissions than traditional pyrolysis; faster heating	High oil yield; cleaner process.
Bio-recycling (emerging)	Utilizes microbes or enzymes to degrade rubber compounds.	Eco-friendly, but very slow	Green solution and sustainable development future.

Source: developed by the authors [8]

Together with Odessa companies, scientists created a steam-thermal reactor, which changes the structure of rubber in the reverse process, i.e., synthetic oil, gas, and metal cord

appear. In addition, excess heat from the thermal reaction can be used to heat hospitals, kindergartens, and schools in winter [10-11].

Conclusions. Considering all of the above, the following main conclusions should be drawn. One of the most environmentally harmful entities that pollute the environment is rubber products. One of the most common rubber products is tires. The constant increase in waste tires is a problem worldwide. Their uncontrolled burning leads to atmospheric pollution with soot, carbon monoxide, cyanide compounds, and dioxides. Modern and innovative technologies for recycling used tires will help solve it. There are a number of different methods for recycling car tires. One of the common methods of recycling tires is energy recovery. Statistical data show that shredding used tires is also one of the modern methods of recycling them. Used tires can be successfully used in various sectors of the national economy.

List of References

1. Доленко Л. Х. *Теорія стратегії підприємства*. Одеса : Астропринт, 2010. 158 с.
2. Ricardo D. L., Araceli M. R. Management and Disposal of Waste Tires to Develop a Company for the Manufacture of Products Based on Recycled Rubber in Tamaulipas, México. *Processes*. 2025. 394 p. DOI: 10.3390/pr13020394.
3. Krzysztof F. Sustainable development of waste tires recycling technologies – recent advances, challenges and future trends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021. Vol. 3. P. 209–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.004>.
4. Чернега В. Ю. Використання зношених шин із аспектів економічного та екологічного використання. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2 (23). С. 275–281. DOI: 10.36910/automash.v2i23.1549.
5. Schubert J. *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Reifen*. Dresden : Fahrbaun-Rollgeräusch, 2003. 113 p.
6. Local utilization of scrap tires : веб-сайт. 2025. URL: http://kynhearth.org/tire_ut.html (дата звернення: 19.05.2025).
7. Mohajerani A., Burnett L., Smith J. V. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. P. 104679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>.
8. Waham A., Wan A. A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. *Materials Advances*. 2025. P. 4992–5010. DOI: 10.1039/D5MA00463B.
9. Campuzano F., Ordoñez J., Daniel M. J. Thermal decomposition characteristics of the tire pyrolysis oil derived from a twin-auger reactor: Study of kinetics and evolved gases. *Fuel*. 2023. Vol. 338. Art. 127248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127248>.
10. Савчук В. В., Денисова М. М. Дослідження способів переробки шин вантажних автомобілів. *Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів (м. Тернопіль, 28–29 листопада 2018 р.)*. Тернопіль, 2018. С. 211–212. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/27425/2/VII_MNTK_2018v1_Savchuk_V_V-Investigation_of_transport_211-212.pdf (дата звернення: 19.05.2025).
11. Березюк А. П., Іщенко В. А. Аналіз способів утилізації відпрацьованих автомобільних шин. *Відповідання до збалансованого природокористування : матеріали міжнародної наукової конференції (м. Донецьк, 20–22 березня 2013 р.)*. Донецьк, 2013. С. 105–106.

References

1. Dolenko, L. Kh. (2010). *Teoriia stratehii pidpriemstva* [Theory of enterprise strategy]. Odesa: Astroprynt. [in Ukrainian]
2. Ricardo, D. L., & Araceli, M. R. (2025). Management and disposal of waste tires to develop a company for the manufacture of products based on recycled rubber in Tamaulipas, México. *Processes*, 13, 394. <https://doi.org/10.3390/pr13020394>
3. Krzysztof, F. (2021). Sustainable development of waste tires recycling technologies – recent advances, challenges and future trends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3, 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.004>
4. Chernega, V. Yu. (2024). Vykorystannia znoshenykh shyn iz aspektiv ekonomichnoho ta ekolohichnoho vykorystannia [Use of worn tires in terms of economic and environmental aspects]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(23), 275–281. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1549> [in Ukrainian].

5. Schubert, J. (2003). *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Reifen*. Dresden: Fahrbahn-Rollgeräusch.
6. Local utilization of scrap tires. (2025). Retrieved May 19, 2025, from http://kynhearth.org/tire_ut.html
7. Mohajerani, A., Burnett, L., & Smith, J. V. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations. *Resources, Conservation and Recycling*, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
8. Waham, A., & Wan, A. (2025). A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. *Materials Advances*, 4992–5010. <https://doi.org/10.1039/D5MA00463B>
9. Campuzano, F., Ordoñez, J., & Daniel, M. J. (2023). Thermal decomposition characteristics of the tire pyrolysis oil derived from a twin-auger reactor: Study of kinetics and evolved gases. *Fuel*, 338, 127248. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127248>
10. Savchuk, V. V., & Denysova, M. M. (2018). Doslidzhennia sposobiv pererobky shyn vantazhnykh avtomobiliv [Research of methods of processing truck tires]. In *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students* (pp. 211–212). Ternopil. Retrieved May 19, 2025, from https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/27425/2/VII_MNTK_2018v1_Savchuk_V_V-Investigation_of_transport_211-212.pdf [in Ukrainian]
11. Berezuk, A. P., & Ishchenko, V. A. (2013). Analiz sposobiv utylizatsii vidpratsiovanykh avtomobilnykh shyn [Analysis of methods of utilization of used car tires]. In *Vid zapovidannia do zbalansovanoho pryrodokorystuvannia: Proceedings of the International Scientific Conference* (pp. 105–106). Donetsk. [in Ukrainian]

І. А. Шльончак¹, доц., канд. техн. наук, **М. П. Рудь¹**, доц., канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

Можливі прогресивні методи переробки автомобільних шин

Збільшення кількості виробленої продукції спричиняє збільшення виробничих відходів. Проблема надмірних виробничих відходів в Україні стоїть гостро. Одним з найбільш екологічно шкідливих утворень, що забруднюють навколишнє середовище, є гумотехнічні вироби. Перелік виробів з гуми великий: ізоляція для проводів, рукавички, предмети домашнього вжитку, взуття та, звичайно ж, шини. Метою статті є дослідження можливих методів переробки автомобільних шин та встановлення найраціональнішого методу з точки зору сучасних інноваційних методів переробки шин.

Одним з найпоширеніших гумотехнічних виробів є шини. Склад сучасних шин являє собою суміш різних компонентів: добавок, наповнювачів, пластифікаторів та інших спеціальних добавок. Постійне збільшення кількості відпрацьованих шин є проблемою в усьому світі. Оскільки гума має високу стійкість до факторів навколишнього середовища, накопичення великих обсягів використаних шин створює серйозну екологічну проблему. Сучасні та інноваційні технології переробки використаних шин допоможуть її вирішити. Існує ряд різних методів переробки автомобільних шин. Тому в дослідженні представлені різні методи переробки автомобільних шин. Особлива увага приділялася сучасним методам. Існує ряд різних методів переробки автомобільних шин. Одним із поширених методів переробки шин є рекуперація енергії. Статистичні дані показують, що подрібнення використаних шин також є одним із сучасних методів їх переробки.

Дослідження з використанням аналітичного методу збору інформації встановили шкідливий вплив звалищ використаних автомобільних шин. У зв'язку з цим питання переробки шин у світі стає надзвичайно гострим. Така ж ситуація спостерігається і в Україні.

У статті зроблено висновки щодо найпоширеніших методів переробки автомобільних шин. Основні методи переробки автомобільних шин базуються на рекуперації енергії, яка була витрачена на їх виробництво.

переробка гумової крихти, піроліз, мікробіологічні процеси переробки шин, рекуперація енергії, забруднення навколишнього середовища, гумотехнічні вироби

Одержано (Received) 21.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025

УДК 656.073

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.400-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.400-409)**А. А. Кочина**, доц., канд. техн. наук, **С. М. Неронов***Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна**e-mail: kochina.tsl@gmail.com*

Визначення та оцінка попиту на разові замовлення на ринку транспортних послуг у міжміському сполученні у Київській області та за її межами

Стаття присвячена дослідженню ринку транспортних послуг в міжміському сполученні при перевезенні вантажів за разовими замовленнями. У результаті досліджень визначено джерела отримання інформації про потік разових замовлень на ринку вантажних перевезень у міжміському сполученні. На основі емпіричних даних проведено аналіз ринку разових замовлень у Київській області та виявлено закономірності їхнього надходження. За результатами дослідження автотранспортні підприємства мають можливість визначати привабливі напрямки перевезень за ймовірністю отримання замовлення в зворотному напрямку перевезень як у межах Київської області, так за її межами для інших регіонів України. **логістичний сайт, міжміське сполучення, перевезення вантажів, попит, разові замовлення, імовірність**

Постановка проблеми. У загальній структурі ринку транспортних послуг провідне місце посідає сегмент міжміських вантажоперевезень, що зумовлено високими обсягами внутрішньодержавного товарообміну між регіонами та областями. Основними складовими попиту на ринку міжміських автомобільних вантажоперевезень є постійні та разові замовлення. Постійні замовлення реалізуються в межах довгострокових контрактів між вантажовласниками та перевізниками. Водночас разові замовлення, які становлять майже половину загального обсягу ринку, викликають особливий інтерес для дослідження з огляду на необхідність формування ефективної стратегії поведінки транспортного оператора. З іншого боку, підвищення ефективності транспортного обслуговування має ґрунтуватися на достовірній та якісній вихідній інформації щодо попиту на транспортні послуги. Недостатня точність або неналежна якість таких даних часто призводить до хибних аналітичних висновків і, як наслідок, до неефективних управлінських рішень. У цьому контексті, проблема адекватної оцінки попиту набуває особливої актуальності при розв'язанні як наукових, так і прикладних задач, пов'язаних з оптимізацією функціонування транспортних систем, оскільки забезпечує достовірність результатів на стадії діагностики досліджуваного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконалення процесу обслуговування замовлень на вантажні перевезення в міжміському сполученні передбачає застосування сучасних методів математичного моделювання, що орієнтовані на пошук та обґрунтування оптимальних управлінських рішень, необхідних для ефективної організації взаємодії між усіма учасниками логістичного процесу доставки вантажів.

Один із підходів до визначення розподілу вантажопотоків ґрунтується на моделі [1], яка передбачає мінімізацію загальних транспортних витрат з метою встановлення оптимального обсягу вантажопотоку між пунктами утворення та споживання вантажів. Інший підхід [2] до моделювання міжміських вантажних перевезень базується на

побудові моделі, в якій вузлами виступають міста або регіони країни, а ребрами – міжміські маршрути вантажних перевезень. Як критерій ефективності в цій моделі використовуються витрати на транспортування.

Прогнозування вантажопотоків у моделі [3] ґрунтується на положеннях теорії масового обслуговування, яка реалізована у вигляді математичної моделі, де критерієм оптимізації виступає мінімізація затримок доставки вантажів, що залежать від інтенсивності вхідного вантажопотоку. У рамках моделі передбачається фіксований рівень попиту на транспортні послуги, який визначається зовнішніми (екзогенними) чинниками.

Важливою складовою ефективної організації міжміських перевезень у зворотному напрямку є питання маршрутизації порожніх транспортних засобів. У дослідженні [4] представлено огляд попередніх наукових підходів, присвячених руху транспортних засобів без вантажу, що моделюється як нелінійна задача з метою максимізації чистого прибутку. У межах цієї моделі попит розглядається як випадкова змінна, тоді як пропозиція визначається як детермінована величина. Серед обмежень моделі слід видокремити припущення щодо однорідності парку транспортних засобів та відсутність урахування змін у кількості автомобілів, що готові до виконання замовлень у конкретних пунктах відправлення або призначення. У роботі [5] було запропоновано комбінований підхід, в якому поєднано детерміновані параметри (відомі маршрути, витрати та доходи) зі стохастичними (інформація щодо часу відправлення та прибуття вантажу). Основним недоліком цієї моделі є підвищені вимоги до інформаційного забезпечення транспортного процесу.

Окрім моделювання безпосередньо процесу перевезень, важливим є питання стратегічного управління процесами, що відбуваються в транспортній системі країни. Отже, прийняття обґрунтованих рішень є ключовим елементом будь-якого управлінського процесу, тому ця проблема є предметом численних наукових досліджень. Запропонована методика вибору стратегії поведінки учасників транспортного ринку в роботі [6] базується на порівнянні фінансових результатів потенційного замовника послуг з перевезення вантажів залежно від типу транспорту, який може бути використаний для виконання перевезення. Перевагою цієї методики є розробка інтегрального показника якості транспортного обслуговування, який можна розраховувати не лише для підприємства в цілому, а й для окремих видів вантажів, послуг, маршрутів та клієнтів. Однак недоліком цієї методики є те, що її залежності не можуть бути використані для оцінки ефективності діяльності перевізників з урахуванням ймовірнісного характеру надходження разових замовлень. У роботі [7] формування стратегій для автотранспортних підприємств, які обслуговують разові замовлення, ґрунтується на двох показниках. Першим є співвідношення інтенсивності надходження разових замовлень до інтенсивності надходження автомобілів, а другим – максимально допустима для перевізника відстань подачі автомобіля для наступного завантаження в оборотному рейсі. Аналіз результатів, отриманих за кожною зі стратегій, показав, що найбільш вигідними є стратегії, коли відстань порожньої подачі автомобіля не перевищує 250 км. Крім того, для кожної з цих стратегій питомий прибуток перевізника точно описується нормальним розподілом.

Таким чином, при моделюванні попиту на міжміські вантажні перевезення доцільно використовувати апріорні моделі, оскільки вони не змінюють дальність перевезень, але впливають на ймовірність їх здійснення, що є характерним для процесу перевезення вантажів у міжміському сполученні. Для оцінки існуючого попиту необхідна достовірна інформація, яка надається на спеціалізованих інформаційних сайтах на ринку транспортних послуг разових замовлень для формування стратегії

поведінки автотранспортного підприємства.

Постановка завдання. Мета даної статті полягає в визначенні та оцінці попиту на ринку разових замовлень на прикладі Київської області у міжміському сполученні. Результати досліджень дозволить перевізнику в процесі прийняття рішення щодо обслуговування разового замовлення на основі об'єктивної інформації та закономірностей потоку разових замовлень визначати стратегію поведінки, що ґрунтується на визначенні імовірності отримати наступне замовлення в зворотному напрямку.

Виклад основного матеріалу. Серед ключових чинників формування міжміських вантажопотоків розглядаються наступні показники:

- дислокаційні фактори, які відображають потребу в перевезеннях, зумовлену необхідністю забезпечення населення або виробництва певними товарами чи сировиною. Аналіз обсягів споживання дозволяє визначити рівень, інтенсивність, точки зародження та напрямки вантажних перевезень;

- номенклатура вантажів та спеціалізація регіонів на виробництві конкретних видів продукції;

- фізичні характеристики вантажів, які впливають на вибір виду транспорту та способу перевезення;

- організаційно-функціональні чинники, зокрема обсяг виробництва, застосування різноманітних каналів збуту та територіальне розширення товарних потоків;

- територіальні чинники, зокрема густота населення та просторове розташування міських утворень, які безпосередньо впливають на специфіку дистрибуції готової продукції;

- динамічні чинники, які пов'язані із сезонними коливаннями попиту на окремі види продукції;

- цінові фактори, які також мають значний вплив на обсяги та напрямки вантажопотоків.

Дослідження попиту на вантажні перевезення в Київській області доцільно проводити як у внутрішньообласному сполученні, так і за її межами, з урахуванням вхідних і вихідних вантажопотоків на території України. При цьому необхідно враховувати випадковий характер попиту на транспортні послуги, розглядаючи елементарною одиницею попиту заявку на транспортне обслуговування. Заявка - це виражена на ринку потреба клієнта в транспортних послугах, підкріплена його купівельною спроможністю. Вона є підставою для ініціювання взаємодії між учасниками логістичної системи доставки вантажів: експедитором, перевізником, вантажним терміналом та вантажовласником. Сукупність потенційних і фактичних заявок на послуги конкретного підприємства формує попит на його послуги, а сукупність таких заявок для всіх підприємств регіону - загальний попит на транспортні послуги в регіоні.

Кожна заявка може бути кількісно охарактеризована за допомогою певного набору показників, до яких належать: пункт відправлення, пункт призначення, обсяг вантажної партії, відстань доставки та інтервал надходження заявки.

Пропозиція для задоволення наявного попиту на транспортне обслуговування на ринку вантажних перевезень формується автотранспортними підприємствами. В Україні діє значна кількість компаній різного масштабу - великих, середніх та малих, які надають послуги з міжміських вантажних перевезень. Найменшу частку серед перевізників становлять великі підприємства, тоді як найбільшу - малі транспортні компанії, що працюють як з регулярними, так і з разовими замовленнями.

У разі здійснення регулярних перевезень потреба в транспортних послугах, як

правило, доводиться до перевізника через усталені договірні взаємовідносини або завдяки наявним особистим комунікаціям. Натомість разові замовлення мають переважно випадковий характер і надходять через різноманітні інформаційні канали. Вони, як правило, пов'язані з одноразовими потребами вантажовласників у перевезенні вантажів у міжміському сполученні.

Попри те, що фінансовий бар'єр для входу на ринок вантажоперевезень є досить високим, наявний попит на транспортне обслуговування стимулював появу значної кількості нових транспортних компаній, покликаних задовольнити ці потреби. На ринку транспортних послуг України активно діють великі, середні та малі автотранспортні підприємства, що надають послуги з міжміських вантажних перевезень. Для компаній, які не мають довгострокових контрактів або сталих партнерських відносин, ключовим джерелом пошуку замовлень виступає інформаційний простір спеціалізованих логістичних платформ. Такі сайти надають онлайн-доступ до баз даних із актуальною інформацією про наявні замовлення та потреби у транспорті, що дозволяє оптимізувати процес пошуку вантажів чи вільного рухомого складу для учасників ринку.

Основний зміст логістичного сайту визначається потребами його цільової аудиторії, до якої належать як споживачі транспортних послуг, так і автотранспортні підприємства, що формують транспортну пропозицію. Відповідно, структура таких сайтів зазвичай включає два основні розділи: один присвячений наявним вантажам, інший - доступному рухомому складу. Окрім цього, платформи зазвичай містять декілька додаткових розділів із супровідною та довідковою інформацією, яка сприяє ефективній взаємодії між учасниками транспортного ринку.

Основні блоки в структурі логістичного сайту це: інформація про вантаж з характеристикою міжміського та міжнародного сполучення; інформація про рухомий склад та інша допоміжна інформація (каталог клієнтів, добірка законів, розрахунок відстаней, форум тощо).

Крім основних блоків, логістичні сайти також містять елементи для зручності користування та доповнення інформації, серед яких:

- інформаційно-логістичний сервіс у вигляді електронного атласу доріг, що постійно оновлюється і містить дані про автомобільні дороги;
- довідково-пошукова система та база даних про компанії та організації, що надають послуги з перевезень, експедирування та страхування вантажів. Це можуть бути каталоги перевізників, вантажовласників, експедиторів і страхових компаній;
- інформаційний центр, де користувачі можуть розміщувати оголошення, такі як вакансії, продаж транспортних засобів та інші;
- розділ з замовленнями вантажів для перевезення, що є пропозицією для вантажовласників;
- розділ з замовленнями на вільний або попутний транспорт, що представляє пропозицію для перевізників;
- форум, де учасники ринку вантажоперевезень можуть обмінюватися професійним досвідом, шукати роботу і попереджати про недобросовісних партнерів.

Бази даних логістичних порталів містять основну інформацію про складові замовлення вантажовласників і дають можливість здійснювати подальший пошук потенційних клієнтів за параметрами, які відповідають вимогам, що можуть бути задоволені транспортними підприємствами. Ці портали надають інтерфейси для фільтрації та пошуку замовлень, що дозволяє ефективно зв'язувати вантажовласників з перевізниками, що мають необхідні ресурси та умови для виконання перевезень.

На ринку України функціонувало майже два десятки автомобільних

транспортних бірж, які включають не лише вітчизняні ресурси. Серед найбільш відомих платформ в Україні є Lardi-trans.com, Della.ua, Trans.eu, Degruz.com та Cargo.lt [8]. Ці біржі надають можливості для ефективного пошуку перевізників та вантажів, забезпечуючи взаємодію між учасниками ринку вантажоперевезень.

Згідно статистики до повномасштабного вторгнення, найбільш популярним сайтом в Україні був Lardi-trans.com [9]. Спочатку цей ресурс був створений для обробки заявок, однак з часом він перетворився на багатофункціональний робочий майданчик для численних транспортних компаній, включаючи європейські. Сайт став важливим інструментом для організації перевезень, обміну інформацією між перевізниками та вантажовласниками, а також для пошуку потенційних замовлень і транспортних засобів. На сайті Lardi-trans.com для перевізників представлена інформація, яка включає набір рішень для ефективного управління автопарком, а також інструменти для швидкого пошуку вантажу за потрібними напрямками та параметрами. Для вантажовідправників сайт надає інструменти для пошуку транспорту, додавання вантажу або організації тендерів, що дає можливість знайти найкращі умови для перевезення. Для компаній, які здійснюють транспортно-експедиторську діяльність, сайт надає інструменти для пошуку транспорту та вантажу, а також можливість додавання вантажу та організації тендерів для оптимізації перевезення. Крім цього, на сайті також є елементи страхування, розрахунок відстані, карта поштових зон та інші додаткові функції. Сайт є зручним інструментом для користувачів, зокрема для перевізників і вантажовласників, які мають зареєструватися для отримання доступу до інформації. Однак, враховуючи необхідність формування масиву даних про потік разових замовлень, який потребує постійного фіксування даних, сайт наразі не надає можливості отримати цю інформацію в потрібному форматі для аналізу.

Ще одним провайдером логістичних послуг є платформа Cargo.lt, яка забезпечує доступ до інформації щодо пропозицій вантажів і транспортних засобів як на українському ринку, так і за його межами. Інтерфейс сайту зручно організований для переміщення між різними блоками послуг. Окрім автомобільного транспорту, на сайті також надається інформація про морський та повітряний транспорт. Крім того, є додаткові блоки: карта, форум, оголошення, каталог, аукціон, сертифікати та сторінка для пошуку вакансій за різними категоріями. Однак головним недоліком цього сайту, як і у випадку з Lardi-trans.com, є необхідність реєстрації для доступу до будь-якої інформації. Також сайт не дає можливості детально аналізувати динаміку потоків разових замовлень, що обмежує його використання для дослідження.

Отримати повну інформацію в режимі реального часу можна без реєстрації на сайті Della.ua, який займає друге місце за популярністю серед користувачів в Україні. На сайті представлена інформація про замовлення на перевезення вантажів в Україні, міжнародні вантажі, транспорт України та міжнародний транспорт. Враховуючи можливість отримати інформацію про замовлення в реальному часі, для формування масиву даних про потік разових замовлень у Київській області в роботі будуть використані дані саме з цього логістичного сайту.

Потік разових замовлень на вантажні перевезення доцільно розглядати як послідовність однотипних подій, що реалізуються у різні моменти часу з певною регулярністю. Такий потік має декілька важливих властивостей, серед яких основними є: стаціонарність, відсутність післядії та ординарність. Якщо потік замовлень відповідає цим властивостям, то він є найпростішим потоком однорідних подій, що дозволяє спростити моделювання і аналіз його динаміки [10].

Стаціонарний характер потоку замовлень передбачає, що ймовірність отримання визначеної кількості замовлень протягом певного часового інтервалу визначається лише його тривалістю та не залежить від конкретного моменту початку відліку. Отже, якщо потік характеризується властивістю стаціонарності, то ймовірність надходження

певної кількості замовлень n протягом інтервалу тривалістю τ залежить виключно від значення n і τ , а не від конкретного моменту початку цього інтервалу. Властивість відсутності післядії передбачає, що надходження замовлень є статистично незалежними подіями. Це означає, що для будь-яких значних перерв у часі τ , кількість замовлень n , які надходять на кожний із цих проміжків, не залежить від кількості замовлень, що надійшли в інший період. Це властивість підтверджує, що надходження замовлень у різні періоди є взаємно незалежними. Ординарність потоку замовлень означає, що ймовірність надходження двох або більше замовлень за дуже короткий проміжок часу є дуже малою порівняно з ймовірністю надходження лише одного замовлення. Ця властивість передбачає, що за надзвичайно короткий проміжок часу може з'явитися лише одне замовлення. Таким чином, ймовірність того, що кількість замовлень, які надходять за короткий проміжок часу, буде більшою за один, є незначною.

Якщо потік утворюється від численних незалежних рідкісних подій (наприклад, замовлень), кожна з яких має незначний вплив на загальну кількість замовлень, то цей комбінований потік наближається до простого потоку однорідних подій і слідує розподілу Пуассона. Розподіл Пуассона часто використовується для моделювання таких процесів, де події відбуваються випадково і рідко, і ймовірність кількості подій у певному проміжку часу можна описати за допомогою цього розподілу. Таким чином, разове замовлення вантажовідправника, яке має виконуватися протягом доби, є рідкісною подією. Кількість таких замовлень може бути значною, оскільки на ринку перевезень існує велика кількість вантажовідправників, які потребують разових перевезень. Водночас, при регулярних перевезеннях для окремих вантажовідправників часто укладаються довгострокові контракти з транспортно-експедиційними або транспортними підприємствами, що зменшує кількість разових замовлень для конкретного відправника. Це дозволяє сформулювати припущення про те, що надходження разових замовлень по всій країні протягом доби утворює сумарний потік, який відповідає найпростішому потоку подій.

Застосування розподілу Пуассона для моделювання потоку разових замовлень дозволяє описати динаміку надходження замовлень на перевезення вантажів, враховуючи рідкість і незалежність таких подій. Це дає змогу створити аналітичну модель для прогнозування і планування вантажопотоків, що є важливим етапом в оптимізації транспортних і логістичних процесів.

Головним параметром у моделі виступає інтенсивність надходження разових замовлень λ на перевезення вантажів, відповідно ймовірність того, що за інтервал часу τ поступить рівно n замовлень, обчислюється таким чином

$$P\{X\} = \frac{(\lambda \cdot \tau)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda \tau}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

де $X = n$ – кількість замовлень на перевезення вантажів, од.; τ – період надходження замовлень на перевезення вантажу, $\tau = 1$ доба.

Для отримання точної інформації щодо кількості поданих замовлень на міжміські вантажоперевезення впродовж доби, важливо враховувати, що одне й те ж замовлення може бути повторно заявлене кілька разів на транспортно-інформаційному порталі. Це може створювати штучне завищення кількості замовлень, тому потрібне очищення і обробка первинних даних.

На основі визначення основних параметрів, за якими буде здійснюватися збір інформації про попит сегменту ринку разових замовлень, був отриманий масив даних з логістичного сайту Della.ua. Заявки опрацьовувались в масив даних, які надходять в Київську область з інших регіонів країни та заявки, які поступають з Київської області

по усім напрямкам перевезень. Після виконання операцій очищення від повторень замовлень з'являється можливість оцінити рівень спотворення первинних даних щодо загальної кількості замовлень на міжміські перевезення вантажів за визначений період, який в середньому склав майже 40 %. Найбільшу кількість замовлень фіксується у четвер та п'ятницю, а найменшу - у суботу та неділю, однак, попит на перевезення залишається і в вихідні дні, де за дві доби він складає 3566 одиниць. Кількість замовлень у робочі дні досягає 12434 одиниць, що становить 77% від загальної кількості. У вихідні дні спостерігається невеликий відсоток дублювань: 22,3% у порівнянні з робочими днями, де цей показник досягає 45,8%.

Згідно з результатами розрахунків, потік замовлень, який залишився після обробки, показує, що з Київської області надходить більше замовлень, ніж туди потрапляє. Однак різниця складає лише 1473 одиниці, що свідчить про приблизно однаковий попит у обох напрямках. На території Київської області спостерігаються стабільні вантажопотоки в таких напрямках: Білоцерківський район - м. Київ, Бориспільський район - Бучанський район, м. Київ - Бориспільський район, Обухівський район - м. Київ, а також внутрішньорайонні перевезення у Бориспільському районі. Найбільші потоки разових замовлень надходять з Бориспільського та Обухівського районів, а також з м. Києва. У розрізі регіонального поділу (рис. 1) країни найбільший потік замовлень спостерігається з Одеської, Дніпропетровської, Полтавської, Вінницької та Чернігівської областей, тоді як відсутній потік з Луганської області. Невеликий потік замовлень надходить з Донецької та Херсонської областей. Особливо підвищений попит на перевезення в Київську область спостерігається з Дніпропетровської, Черкаської, Житомирської, Харківської та Хмельницької областей. З іншого боку, відсутній потік з Луганської області, а потік з Херсонської, Донецької, Кіровоградської, Запорізької та Закарпатської областей є незначним.

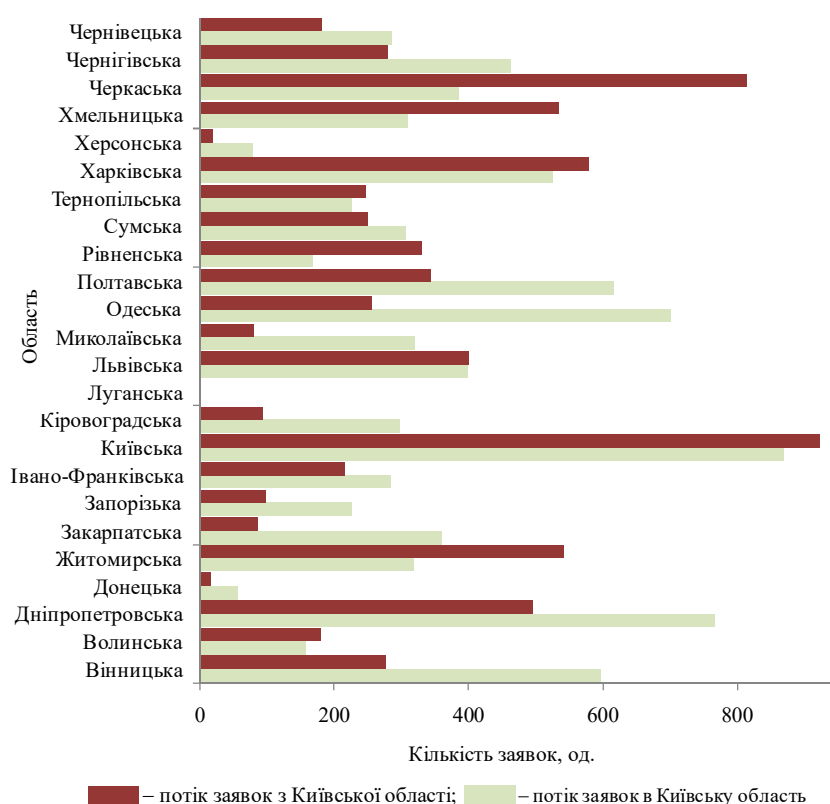


Рисунок 1 – Розподіл потоку разових замовлень Київського регіону серед регіонів країни
Джерело: розроблено автором

Визначення параметрів потоку разових замовлень у Київській області дозволяє проаналізувати наявність закономірностей у надходженні таких замовлень. Відповідно до джерела [11], характер цього потоку відповідає властивостям потоку Пуассона. Обсяг доступної інформації, який необхідно проаналізувати, є обмеженим, тому в таких випадках доцільно використовувати критерій згоди Колмогорова, який дає змогу оцінити відповідність гіпотези даним, які відповідають емпіричним значенням. Для обсягу вибірки значень інтенсивності надходження одноразових замовлень перевірку гіпотези можна здійснити наступним чином.:

$$\Delta = \left| f_i - \frac{(\lambda t)^{v_i}}{v_i!} \cdot e^{-\lambda t} \right|, \quad (2)$$

де f_i – накопичена частота i -го інтервалу, од.; v_i – значення вибірки i -го інтервалу, од.

Жодне з обчислених максимальних відхилень між теоретичною та емпіричною функціями розподілу не перевищило критичного значення, для отриманої вибірки воно склало 0,084.

Відповідно до методики, викладеної у [12], було розроблено стратегії поведінки перевізників, які базуються на класифікації напрямків перевезення вантажів за рівнем їхньої привабливості з точки зору ймовірності отримання подальшого замовлення. У результаті були виділені три типи напрямків: привабливі, нейтральні (звичайні) та малопривабливі. Визначення рівня привабливості напрямку перевезення з точки зору ймовірності отримання наступного замовлення здійснюється за такою методикою:

- напрямок вважається привабливим, якщо значення показника α перевищує заданий поріг;
- звичайним, якщо значення α знаходиться в межах середнього рівня;
- непривабливим, якщо значення α є нижчим від визначеного рівня.

Показник α визначається як відношення інтенсивності надходження разових замовлень до інтенсивності прибуття автомобілів, які претендують на їх виконання. У процесі класифікації напрямків перевезень за рівнем привабливості оцінюється ймовірність отримання перевізником наступного замовлення. У межах дослідження інтенсивність надходження автомобілів розглядається як інтенсивність потоку разових замовлень, що надходять до Київської області з відповідного регіону.

Результати розрахунку привабливості напрямків вантажоперевезень за основними регіональними напрямками показали, що для перевізників, які працюють у Київській області, найбільш привабливими напрямками є перевезення до Волинської, Житомирської, Київської, Рівненської, Тернопільської, Харківської, Хмельницької та Черкаської областей. Київська область є привабливим напрямком вантажоперевезень майже для всіх регіонів України, за винятком Житомирської, Рівненської, Хмельницької та Черкаської областей. Примітно, що більшість регіонів, які виявилися непривабливими для автоперевізників із Київської області, водночас демонструють високий інтерес до перевезень у зворотному напрямку - з цих областей до Київської. Така ситуація свідчить про значний попит на ринку разових вантажоперевезень у Київській області, що підтверджується співвідношенням потоку замовлень між цим регіоном та іншими областями країни.

Висновки. Формування масиву даних для аналізу попиту в Київській області за допомогою логістичного порталу Della.ua протягом тижня виявило велику кількість

дублювань замовлень, що суттєво викривляло реальну картину потреб у вантажоперевезеннях на ринку разових замовлень. Завдяки очищенню потоку разових вантажних замовлень вдалося сформувати об'єктивну картину сегмента ринку разових перевезень у регіональному розрізі щодо Київської області та безпосередньо на її території.

На території Київської області спостерігаються стабільні вантажопотоки в чотирьох основних напрямках та у внутрішньорайонних перевезеннях у Бориспільському районі. У розрізі регіонального поділу країни найбільший потік вантажів із Київської області спрямовується в п'ять регіонів, що обумовлено сучасними умовами воєнного стану та географічною близькістю. Потоки вантажів у Київську область мають деякі відмінності порівняно з потоками з області. Такий аналіз попиту на ринку транспортних послуг дозволяє визначати привабливі напрямки перевезень для автотранспортних підприємств з точки зору ефективності перевезень в зворотному напрямку, враховуючи встановлені закономірності потоки разових замовлень.

Список літератури

1. Hitchcock F.L. Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities. *Journal of Mathematics and Physics*. 1941. Vol. 20, P. 224–230.
2. Roberts P.O. Transport Planning: Models for Developing Countries: unpublished Ph.D. Dissertation. Evanston: Civil Engineering Department. Northwestern University, 1966. 228 p.
3. Petersen E.R., Fullerton H.V. The Railcar Network Models. Canadian Institute of Guided Ground Transport. 1975. P. 75–11.
4. Dejax Pierre J., Gabriel Crainic Teodor. A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation. *Transportation Science*. 1987. Vol. 21(4). P. 227–248.
5. Powell W.B. A Stochastic Model of the Dynamic Vehicle Allocation Problem. *Transportation Science*. 1986. P. 117–129.
6. Нагорний Є.В., Шраменко Н.Ю. Методика вибору оптимальної стратегії поведінки суб'єктів транспортного ринку в умовах конкуренції. *Автомобільний транспорт*. 2006. № 9. С. 127–132.
7. Мосьпан Н. В. Формування стратегій автотранспортних підприємств по обслуговуванню разових замовлень на перевезення вантажів у міжміському сполученні : на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2018. 24 с.
8. Вантажні автомобільні транспортні біржі в Україні: поточний стан і тенденції: LogistFM. URL: <https://logist.fm/publications/vantazhni-avtomobilni-transportni-birzhi-v-ukrayini-potochniy-stan-i-tendenciyi> (дата звернення: 06.03.2025).
9. Корпоративна інформація Lardi-trans : Логістичний сайт компанії Lardi-trans. URL: <https://lardi-trans.com/> (дата звернення: 07.03.2025).
10. Горбачов П.Ф., Мосьпан Н.В. Формалізація процесу обслуговування разових замовлень на перевезення вантажів у міжміському сполученні. *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вип. 72. С. 66–74.
11. Кочина А.А. Визначення закономірностей потоку разових замовлень у міжміському сполученні при управлінні ланцюгами постачань. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. №1 (20). С. 151–159.
12. Горбачов П. Ф., Мосьпан Н.В. Імітаційна модель обслуговування разових замовлень на міжміські вантажоперевезення. *Вісник ХНАДУ*. 2017. Вип. 76. С. 32–39.

References

1. Hitchcock, F. L. (1941). Distribution of a product from several sources to numerous localities. *Journal of Mathematics and Physics*, 20, 224–230.
2. Roberts, P. O. (1966). *Transport planning: Models for developing countries* (Unpublished Ph.D. dissertation). Northwestern University, Civil Engineering Department.
3. Petersen, E. R., & Fullerton, H. V. (1975). *The railcar network models*. Canadian Institute of Guided Ground Transport, 75–11.
4. Dejax, P. J., & Crainic, T. G. (1987). A review of empty flows and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science*, 21(4), 227–248.

5. Powell, W. B. (1986). A stochastic model of the dynamic vehicle allocation problem. *Transportation Science*, 117–129.
6. Nahorni, Ye. V., & Shramenko, N. Yu. (2006). Metodyka vyboru optymalnoi stratehii povedinky subiektiv transportnoho rynku v umovakh konkurentsii [Methodology for choosing the optimal strategy of behavior of transport market actors under competition]. *Avtomobilnyi transport*, 9, 127–132. [in Ukrainian]
7. Mospan, N. V. (2018). *Formuvannia stratehii avtotransportnykh pidpriemstv po obsluhovuvanni razovykh zamovlen na perevezennia vantazhiv u mizhmiskomu spoluchenni* [Formation of strategies of motor transport enterprises for servicing one-time orders for cargo transportation in intercity connections] (Candidate of Technical Sciences dissertation, specialty 05.22.01). Kharkiv. [in Ukrainian].
8. LogictFM. (2025). Vantazhni avtomobilni transportni birzhi v Ukraini: potochnyi stan i tendentsii [Freight automobile transport exchanges in Ukraine: Current state and trends]. Retrieved March 6, 2025, from <https://logist.fm/publications/vantazhni-avtomobilni-transportni-birzhi-v-ukrayini-potochniy-stand-i-tendenciya> [in Ukrainian].
9. Lardi-trans. (2025). Korporatyvna informatsiia [Corporate information]. Retrieved March 7, 2025, from <https://lardi-trans.com/> [in Ukrainian].
10. Horbachev, P. F., & Mospan, N. V. (2016). Formalizatsiia protsesu obsluhovuvannia razovykh zamovlen na perevezennia vantazhiv u mizhmiskomu spoluchenni [Formalization of the process of servicing one-time orders for cargo transportation in intercity connections]. *Visnyk KhNADU*, 72, 66–74. [in Ukrainian].
11. Kochyna, A. A. (2023). Vyznachennia zakonmironosti potoku razovykh zamovlen u mizhmiskomu spoluchenni pry upravlinni lantsiuhamy postachan [Determination of patterns of one-time order flow in intercity connections in supply chain management]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(20), 151–159. [in Ukrainian].
12. Horbachev, P. F., & Mospan, N. V. (2017). Imitatsiina model obsluhovuvannia razovykh zamovlen na mizhmiski vantazhoperevezennia [Simulation model of servicing one-time orders for intercity freight transportation]. *Visnyk KhNADU*, 76, 32–39. [in Ukrainian].

Anastasia Kochina, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Neronov**
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Identification and Assessment of Demand for One-Off Orders in the Intercity Transport Services Market in Kyiv Region and Beyond

The purpose of this article is to define and evaluate the demand in the market of one-time orders on the example of Kyiv region in the intercity traffic. The results of the research will allow the carrier in the process of making a decision on servicing a one-time order, based on objective information and patterns of the flow of one-time orders, to determine a strategy of behaviour based on the distribution of cargo transportation directions according to their attractiveness in terms of the prospects for receiving the next order.

The research identified sources of information on the flow of one-off orders in the long-distance freight market. Full real-time information can be obtained without registration on Della.ua, the second most popular website in Ukraine. Based on the key parameters used to collect information on demand, we obtained data from the logistics website on orders coming to Kyiv region from other regions of the country and orders coming from Kyiv region in all areas of transportation. After clearing the data set of applications, we analysed the distribution of applications in the Kyiv region and beyond. In the Kyiv region, there are stable cargo flows in four main directions and in intra- district traffic in Boryspil district. In terms of the country's regional division, the largest flow of cargo from Kyiv region is directed to five regions, due to the current martial law conditions and geographical proximity. When studying the flow of one-off orders in the freight market, it was found that the flow of one-off orders in Kyiv region corresponds to a Poisson flow.

The analysis of demand in the transport services market made it possible to identify attractive transport routes for transport companies in the Kyiv region with the possibility of returning the carrier to the starting point with a loaded or empty vehicle, depending on the receipt of a return load order, without wasting time waiting for this order. Regions that were not attractive to Kyiv region road hauliers have become attractive for transport from these regions to Kyiv region.

logisticssite, long-distancetraffic, cargotransportation, demand, singleorders, probability

Одержано (Received) 06.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025
Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ INFORMATION ABOUT AUTHORS

Алієв Ельчин Бахтияр огли - старший дослідник, доктор технічних наук, професор кафедри інжинірингу технічних систем, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>, e-mail: aliev@meta.ua.

Elchyn Aliiev - Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>, e-mail: aliev@meta.ua.

Амосов Володимир Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільсько-господарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0154-2886>, e-mail: v_vas_a@ukr.net.

Volodymyr Amosov - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Agricultural Machine Building, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0154-2886>, e-mail: v_vas_a@ukr.net.

Апаракін Антон Русланович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5847-7739>, e-mail: anton.aparakin@gmail.com.

Anton Aparakin - PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5847-7739>, e-mail: anton.aparakin@gmail.com.

Аулін Віктор Васильович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: aulinvv@gmail.com.

Viktor Aulin - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Machinery Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: aulinvv@gmail.com.

Бажан Ігор Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4391-9084>, e-mail: Igor23_81@ukr.net.

Ihor Bazhan - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4391-9084>, e-mail: Igor23_81@ukr.net.

Біда Сергій Васильович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та професійної освіти, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-9333>, e-mail: serhii.bida@pdau.edu.ua.

Serhii Bida – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Building and Vocational Education, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-9333>, e-mail: serhii.bida@pdau.edu.ua.

Біловод Олександра Іванівна - професорка, кандидат технічних наук, доцентка кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3470-0091>, e-mail: oleksandra.bilovod@pdau.edu.ua.

Oleksandra Bilovod - Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3470-0091>, e-mail: oleksandra.bilovod@pdau.edu.ua.

Білоус Ілля Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», асистент кафедри інжинірингу технічних систем, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-6631>, e-mail: bilous.i.m@dsau.dp.ua.

Iliya Bilous - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Assistant of the Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-6631>, e-mail: bilous.i.m@dsau.dp.ua.

Бойко Олег Олександрович - кандидат технічних наук, доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9714-2843>, e-mail: boiko.o.o@nmu.one.

Oleh Boiko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cyberphysical and Information-Measuring Systems, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9714-2843>, e-mail: boiko.o.o@nmu.one.

Васильковський Михайло Олексійович - здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7116-8721>, e-mail: golkercofes@gmail.com.

Mykhailo Vasylovskiy - Student specializing in Industrial Mechanical Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7116-8721>, e-mail: golkercofes@gmail.com.

Васильковський Олексій Михайлович - професор, кандидат технічних наук, професор кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9590-742X>, e-mail: olexa74@ukr.net.

Oleksii Vasylovskiy - Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9590-742X>, e-mail: olexa74@ukr.net.

Висоцька Вікторія Анатоліївна - доцент, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем і мереж, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: 0000-0001-6417-3689, e-mail: victoria.a.vysotska@lpnu.ua.

Victoria Vysotska - Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: 0000-0001-6417-3689, e-mail: victoria.a.vysotska@lpnu.ua.

Воскобойник Євген Костянтинівич - асистент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7653-2607>, e-mail: voskoboinyk.ye.k@nmu.one.

Yevhen Voskoboinyk - Assistant of the Department of Cyberphysical and Information-Measuring Systems, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7653-2607>, e-mail: voskoboinyk.ye.k@nmu.one.

Гевко Іван Богданович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Ivan Nevko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Годорожа Віктор Анатолійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0815-4031>, e-mail: elektromagnetichydrogenerator@gmail.com.

Viktor Hodorozha - PhD student in Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0815-4031>, e-mail: elektromagnetichydrogenerator@gmail.com.

Горпинченко Ольга Володимирівна - доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки, менеджменту та комерційної діяльності, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1271-4145>, e-mail: 77ov77@ukr.net.

Olha Horpynchenko - Associate Professor, PhD in Economics (Candidate of Economic Sciences), Associate Professor of the Department of Economics, Management and Commercial Activity, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1271-4145>, e-mail: 77ov77@ukr.net.

Гриньків Андрій Вікторович - старший дослідник, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4478-1940>, e-mail: AVGrinkiv@gmail.com.

Andrii Hrynkiv - Senior Researcher, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Machinery Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4478-1940>, e-mail: AVGrinkiv@gmail.com.

Грищенко Володимир Олександрович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Національний університет біоресурсів і природокористування України, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-3650>, e-mail: vlgr@nubip.edu.ua.

Volodymyr Hryshchenko - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Automation and Robotic Systems named after Academician I.I. Martynenko, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-3650>, e-mail: vlgr@nubip.edu.ua.

Джирма Станіслав Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2248-1653>, e-mail: stas55871@ukr.net.

Stanislav Dzhyrma - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Road Machines and Civil Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2248-1653>, e-mail: stas55871@ukr.net.

Добуш Андрій Ігорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5038-4299>, e-mail: Andriy.osf@gmail.com.

Andriy Dobush - PhD student in Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5038-4299>, e-mail: Andriy.osf@gmail.com.

Довбуш Анатолій Дмитрович - старший викладач кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6656-9150>, e-mail: anatoliydobush@gmail.com.

Anatoliy Dovbush - Senior Lecturer of the Department of Technical Mechanics and Agricultural Machinery, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6656-9150>, e-mail: anatoliydobush@gmail.com.

Довбуш Тарас Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8354-7276>, e-mail: tarasdobush@gmail.com.

Taras Dovbush - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Agricultural Machinery, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8354-7276>, e-mail: tarasdobush@gmail.com.

Доренський Олександр Павлович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua.

Oleksandr Dorenskyi - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Cybersecurity and Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua.

Дячун Андрій Євгенович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Andrii Diachun - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Єфіменко Тімур Олександрович - здобувач вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2403-6232>.

Timur Yefimenko - Bachelor's degree student in Computer Engineering, Odesa I. I. Mechnykov National University, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2403-6232>, e-mail: efimenko.timur@stud.onu.edu.ua.

Зінзура Василь Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6357-064X>, e-mail: vasiliyzinzura@gmail.com.

Vasyl Zinzura - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6357-064X>, e-mail: vasiliyzinzura@gmail.com.

Іванкова Олена Володимирівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1825-0262>, e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua.

Olena Ivankova - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering and Road Transport, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1825-0262>, e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua.

Йовченко Алла Василівна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7069-1092>, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua.

Alla Yovchenko – PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Automobiles and Technology of Their Operation, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7069-1092>, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua.

Качур Артем Вячеславович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4658-2056>, e-mail: kachurav@khmnu.edu.ua.

Artem Kachur - PhD student in Computer Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4658-2056>, e-mail: kachurav@khmnu.edu.ua.

Кириченко Андрій Миколайович - професор, доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4335-9588>, e-mail: kyrychenkoam@kntu.kr.ua.

Andriy Kyrychenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work, Professor of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4335-9588>, e-mail: kyrychenkoam@kntu.kr.ua.

Кириченко Антон Миколайович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0041-3799>, e-mail: kirichenko.am@knutd.com.ua.

Anton Kyrychenko - PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Information and Computer Technologies, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0041-3799>, e-mail: kirichenko.am@knutd.com.ua.

Кісільов Руслан Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1502-0034>, e-mail: ruslan_vik@ukr.net.

Ruslan Kisilyov - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Agricultural Machine Building, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1502-0034>, e-mail: ruslan_vik@ukr.net.

Клименко Василь Васильович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6840-7307>.

Vasyl Klymenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6840-7307>.

Ковальов Сергій Григорович - кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3922-8697>, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Serhii Kovalov - PhD in Pedagogy (Candidate of Pedagogical Sciences), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3922-8697>, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Ковальов Юрій Григорович - кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1729-2033>, e-mail: yukovalyov@ukr.net.

Yurii Kovalov - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Materials Science and Foundry Production, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1729-2033>, e-mail: yukovalyov@ukr.net.

Комар Роман Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7965-4784>, e-mail: rkomar@ukr.net.

Roman Komar - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7965-4784>, e-mail: rkomar@ukr.net.

Конончук Сергій Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6683-8450>, e-mail: kononchuk_s@ukr.net.

Sergiy Kononchuk - Associate Professor, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Materials Science and Foundry, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6683-8450>, e-mail: kononchuk_s@ukr.net.

Копильців Дмитро Васильович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1050-2701>, e-mail: DmitryKopyltsiv@ukr.net.

Dmytro Kopyltsiv - PhD student in Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1050-2701>, e-mail: DmitryKopyltsiv@ukr.net.

Корогод Ганна Олександрівна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1670-3125>, e-mail: korogod.go@knutd.com.ua.

Hanna Korohod - PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Information and Computer Technologies, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1670-3125>, e-mail: korogod.go@knutd.com.ua.

Котов Борис Іванович - доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua.

Borys Kotov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering, Podilskyi State University, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua.

Кочина Анастасія Анатоліївна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8377-4770>, e-mail: kochina.tsl@gmail.com.

Anastasiia Kochina – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8377-4770>, e-mail: kochina.tsl@gmail.com.

Кошеленко Євгеній Валерійович - кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3600-1550>, e-mail: Koshenko.ye.v@nmu.one.

Yevhenii Koshenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3600-1550>, e-mail: Koshenko.ye.v@nmu.one.

Кравченко Володимир Іванович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії, Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кіровоград, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4989-1591>, e-mail: cerb_kravchenko@ukr.net.

Volodymyr Kravchenko - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulic Engineering, Water and Electrical Engineering, Kherson State Agrarian and Economic University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4989-1591>, e-mail: cerb_kravchenko@ukr.net.

Криштопа Святослав Ігорович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7899-8817>, e-mail: auto.ifntung@ukr.net.

Sviatoslav Kryshchop - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7899-8817>, e-mail: auto.ifntung@ukr.net.

Кузик Олександр Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-3760>, e-mail: kuzykov@gmail.com.

Oleksandr Kuzyk - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science and Foundry Production, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-3760>, e-mail: kuzykov@gmail.com.

Кулагін Віктор Петрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Приватний вищий навчальний заклад "Європейський університет", м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1334-2277>, e-mail: victor@kulagin.com.ua.

Viktor Kulagin - PhD student in Computer Science, Private Higher Education Establishment "European University", Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1334-2277>, e-mail: victor@kulagin.com.ua.

Лапченко Артем Сергійович - старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>, e-mail: las83@ukr.net.

Artem Lapchenko - Senior Researcher, PhD in Engineering (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>, e-mail: las83@ukr.net.

Лещенко Сергій Миколайович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільсько-господарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9339-4691>, e-mail: serafsgm@ukr.net.

Serhii Leshchenko - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Agricultural Machine Building, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9339-4691>, e-mail: serafsgm@ukr.net.

Лещук Роман Ярославович - доцент, кандидат технічних наук, декан факультету інженерії машин, споруд та технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0380-2063>, e-mail: r_leshchuk@ukr.net.

Roman Leshchuk - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Dean of the Faculty of Machine, Construction and Technology Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0380-2063>, e-mail: r_leshchuk@ukr.net.

Лисенко Сергій Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Serhii Lysenko - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Лисенко Сергій Миколайович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: [0000-0001-7243-8747](https://orcid.org/0000-0001-7243-8747), e-mail: sirogyk@ukr.net.

Sergii Lysenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Engineering and Information Systems, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: [0000-0001-7243-8747](https://orcid.org/0000-0001-7243-8747), e-mail: lysenkos@khmnu.edu.ua.

Лозинська Ольга Володимирівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем і мереж, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: [0000-0002-5079-0544](https://orcid.org/0000-0002-5079-0544), e-mail: olha.v.lozynska@lpnu.ua.

Olga Lozynska - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: [0000-0002-5079-0544](https://orcid.org/0000-0002-5079-0544), e-mail: olha.v.lozynska@lpnu.ua.

Лузан Петро Григорович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-999X>, e-mail: luzanpg@ukr.net.

Petro Luzan - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Agricultural Machine Building, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-999X>, e-mail: luzanpg@ukr.net.

Марків Оксана Олександрівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем і мереж, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: 0000-0002-1691-1357, e-mail: oksana.o.markiv@lpnu.ua.

Oksana Markiv - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-1691-1357, e-mail: oksana.o.markiv@lpnu.ua.

Мартинів Лариса Ярославівна - старший викладач кафедри комп'ютерних систем та технологій, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7351-1467>, e-mail: larysa.yaroslavna@onu.edu.ua.

Larysa Martynovych - Senior Lecturer at the Department of Computer Systems and Technologies, Odesa I. I. Mechnykov National University, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7351-1467>, e-mail: larysa.yaroslavna@onu.edu.ua.

Матвієнко Олександр Олександрович - здобувач наукового ступеня доктора наук, доцент, кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5408-8293>, e-mail: richdad.ua@gmail.com.

Oleksandr Matviienko - Doctoral Student, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5408-8293>, e-mail: richdad.ua@gmail.com.

Матвієнко Роман Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3743-7511>, e-mail: RomanMatviienko@ukr.net.

Roman Matviienko - PhD student in Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3743-7511>, e-mail: RomanMatviienko@ukr.net.

Матійчук Любомир Павлович - доцент, доктор економічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-4683>, e-mail: mlpstat@gmail.com.

Liubomyr Matiihuk - Associate Professor, Doctor of Sciences (Economics), Professor of the Department of Computer Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-4683>, e-mail: mlpstat@gmail.com.

Микитій Іван Михайлович - доктор філософії, асистент кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-6349>, e-mail: mukutiy@gmail.com.

Ivan Mykyti - Doctor of Philosophy, Assistant Professor of the Department of Automobile Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-6349>, e-mail: mukutiy@gmail.com.

Мироненко Валентин Григорович - доктор технічних наук, професор, завідувач відділу агронавігації та автоматизації мобільних процесів, Інститут механіки та автоматизації агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1227-2471>, e-mail: mironenko1952@ukr.net.

Valentyn Myronenko - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Agronavigation and Automation of Mobile Processes, Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1227-2471>, e-mail: mironenko1952@ukr.net.

Музичишин Ярослав Ігорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8478-7405>, e-mail: slmzig@gmail.com.

Yaroslav Muzychyshyn - PhD student in Computer Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8478-7405>, e-mail: slmzig@gmail.com.

Невдаха Юрій Андрійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4355-4065>, e-mail: uanevdakha@ukr.net.

Yurii Nevdakha - Associate Professor, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4355-4065>, e-mail: uanevdakha@ukr.net.

Неронов Сергій Миколайович – старший викладач кафедри комп'ютерних систем, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-1271>, e-mail: sernikner@gmail.com.

Serhii Neronov – Senior Lecturer of the Department of Computer Systems, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2381-1271>, e-mail: sernikner@gmail.com.

Недельський Дмитро Сергійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: dimanedelya9642@gmail.com.

Dmytro Nedelskyi - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: dimanedelya9642@gmail.com.

Никитюк Андрій Георгійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9408-228X>, e-mail: knowledgebasis@gmail.com.

Andriy Nikityuk - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9408-228X>, e-mail: knowledgebasis@gmail.com.

Осадчий Сергій Іванович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів, Українська державна льотна академія, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1811-3594>, e-mail: srg2005@ukr.net.

Serhii Osadchy - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Flight Operations and Flight Safety, Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1811-3594>, e-mail: srg2005@ukr.net.

Остапчук Юлія Олександрівна - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>, e-mail: juli.biluk97@gmail.com.

Yuliia Ostapchuk - PhD student in Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>, e-mail: juli.biluk97@gmail.com.

Панцир Юрій Іванович - кандидат технічних наук, доцент, декан інженерно-технічного факультету, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2969-1936>, e-mail: panziruriy@gmail.com.

Yuriy Pansyr - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Podilskyi State University, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2969-1936>, e-mail: panziruriy@gmail.com.

Пашинський Віктор Антонович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6399>, e-mail: pva.kntu@gmail.com.

Victor Pashynskiy – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building, Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6399>, e-mail: pva.kntu@gmail.com.

Пашинський Микола Вікторович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-523X>, e-mail: mykola.pashynskiy@gmail.com.

Mykola Pashynskiy – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Building, Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-523X>, e-mail: mykola.pashynskiy@gmail.com.

Петраш Олександр Васильович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та професійної освіти, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8151-6460>, e-mail: oleksandr.petrash@pdau.edu.ua.

Oleksandr Petrash – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Building and Vocational Education, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8151-6460>, e-mail: oleksandr.petrash@pdau.edu.ua.

Петраш Руслан Васильович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та професійної освіти, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5812-4044>, e-mail: ruslan.petrash@pdau.edu.ua.

Ruslan Petrash – Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Building and Vocational Education, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5812-4044>, e-mail: ruslan.petrash@pdau.edu.ua.

Петренко Дмитро Іванович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільсько-господарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8123>, e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com.

Dmytro Petrenko - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Agricultural Machine Building, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8123>, e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com.

Підлісний Юрій Іванович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9783-3898>, e-mail: yopodlesny@ukr.net.

Yurii Pidlisnyi - PhD student in Computer Science, National University "Chernihiv Polytechnic", Chernihiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9783-3898>, e-mail: yopodlesny@ukr.net.

Плешков Петро Григорович - професор, кандидат технічних наук, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2141-4811>, e-mail: kafedra.etsem@gmail.com.

Petro Plieshkov - Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2141-4811>, e-mail: kafedra.etsem@gmail.com.

Плешков Сергій Петрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3120-5397>, e-mail: sergploff@gmail.com.

Serhii Plieshkov - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3120-5397>, e-mail: sergploff@gmail.com.

Погорілий Сергій Петрович - заступник директора з наукової роботи, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу мобільної енергетики, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9701-2678>, e-mail: pogorilyy_sergiy@ukr.net.

Sergiy Pogorilyy - Deputy Director for Scientific Work, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Mobile Energy, Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9701-2678>, e-mail: pogorilyy_sergiy@ukr.net.

Портнов Геннадій Давидович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1521-2086>, e-mail: budkom999@gmail.com.

Hennadii Portnov - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Road Machines and Civil Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1521-2086>, e-mail: budkom999@gmail.com.

Прилепа Дмитро Вікторович - кандидат технічних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4022-5496>, e-mail: d.prylepa@cs.sumdu.edu.ua.

Dmytro Prylepa - PhD (Candidate of Technical Sciences), Assistant of the Computer Science Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4022-5496>, e-mail: d.prylepa@cs.sumdu.edu.ua.

Рогатинський Роман Михайлович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8536-4599>, e-mail: rogatynskyi@gmail.com.

Roman Rogatynskyi - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8536-4599>, e-mail: rogatynskyi@gmail.com.

Руденко Олександр Олегович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: alexandrsvwork@gmail.com.

Oleksandr Rudenko - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: alexandrsvwork@gmail.com.

Рудь Максим Петрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8936-6812>, e-mail: hochspannung77@gmail.com.

Maksym Rud – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Automobiles and Technology of Their Operation, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8936-6812>, e-mail: hochspannung77@gmail.com.

Сем'янчук Андрій Ігорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3664-7716>, e-mail: AndriySemianchuk@ukr.net.

Andriy Semianchuk - PhD student in Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3664-7716>, e-mail: AndriySemianchuk@ukr.net.

Семенюта Марина Фролівна - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4639-0545>, e-mail: semeniutamf@kntu.kr.ua.

Marina Semeniuta - Associate Professor, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4639-0545>, e-mail: semeniutamf@kntu.kr.ua.

Сіріков Олександр Іванович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7058-2697>, e-mail: asirikov@i.ua.

Oleksandr Sirikov - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7058-2697>, e-mail: asirikov@i.ua.

Скриннік Іван Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-3197>, e-mail: Skrynnik2002@ukr.net.

Ivan Skrynnik - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Road Machines and Civil Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-3197>, e-mail: Skrynnik2002@ukr.net.

Скрипник Олександр Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5735-0648>, e-mail: skripnik1966@ukr.net.

Oleksandr Skrypnyk - Associate Professor, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Materials Science and Foundry, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5735-0648>, e-mail: skripnik1966@ukr.net.

Смірнов Володимир Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4752-0527>, e-mail: swckntu@gmail.com.

Volodymyr Smirnov - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4752-0527>, e-mail: swckntu@gmail.com.

Смірнова Наталія Володимирівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5683-5766>, e-mail: snvntu@gmail.com.

Nataliia Smirnova - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5683-5766>, e-mail: snvntu@gmail.com.

Сокальська Юлія Олександрівна - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4043-6251>, e-mail: julija_8383@ukr.net.

Yuliia Sokalska - PhD student in Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4043-6251>, e-mail: julija_8383@ukr.net.

Солдатенко Валентин Петрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7781-9343>, e-mail: kirovograd41@gmail.com.

Valentyn Soldatenko - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7781-9343>, e-mail: kirovograd41@gmail.com.

Солярчук Іван Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0639-0364>, e-mail: IvanSolyarchuk@ukr.net.

Ivan Solyarchuk - PhD student in Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0639-0364>, e-mail: IvanSolyarchuk@ukr.net.

Стельмах Андрій Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8364-3575>, e-mail: stelmah0880@gmail.com.

Andrii Stelmakh - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8364-3575>, e-mail: stelmah0880@gmail.com.

Стібайло Олег Юрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9680-5426>, e-mail: oleh.stibailo@gmail.com.

Oleg Stibailo - PhD student in Applied Mechanics, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9680-5426>, e-mail: oleh.stibailo@gmail.com.

Тарандушка Ян Іванович – здобувач вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна; студент Жилінського університету, м. Жиліна, Словаччина, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6103-800X>, e-mail: yan453620@gmail.com.

Yan Tarandushka – Bachelor Student in Automobile Transport, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine; Student of the University of Žilina, Žilina, Slovakia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6103-800X>, e-mail: yan453620@gmail.com.

Тіманов Володимир Вікторович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9988-6897>, e-mail: timanovvolodymyr@gmail.com.

Volodymyr Timanov - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9988-6897>, e-mail: timanovvolodymyr@gmail.com.

Тригуба Анатолій Миколайович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій, Національний природничий університет України, м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661>, e-mail: trianamik@gmail.com.

Anatoliy Tryhuba - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Technologies, National Natural University of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661>, e-mail: trianamik@gmail.com.

Улічев Олександр Сергійович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3736-9613>, e-mail: askin79@gmail.com.

Oleksandr Ulichev - PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of Cybersecurity and Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3736-9613>, e-mail: askin79@gmail.com.

Федін Віталій Олексійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6646-5906>, e-mail: vitalii.fedin@pdau.edu.ua.

Vitalii Fedin - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6646-5906>, e-mail: vitalii.fedin@pdau.edu.ua

Філімоніхін Геннадій Борисович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2819-0569>, e-mail: filimonikhin@ukr.net.

Gennadiy Filimonikhin - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2819-0569>, e-mail: filimonikhin@ukr.net.

Фількін Орест Ігорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Національний природничий університет України, м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3994-9623>, e-mail: filkin.orest@gmail.com.

Orest Filkin - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, National Natural University of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3994-9623>, e-mail: filkin.orest@gmail.com.

Харченко Сергій Олександрович - доцент, доктор технічних наук, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-2565>, e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net.

Serhii Kharchenko - Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-2565>, e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net.

Харченко Фаріда Магомедівна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри агроінжинірингу, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0815-4691>, e-mail: faridakharchenko@gmail.com.

Farida Kharchenko - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Agroengineering, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0815-4691>, e-mail: faridakharchenko@gmail.com.

Хібовська Юлія Олексіївна - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Сумський державний університет, м. Суми, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5832-3134>, e-mail: y.khibovska@cs.sumdu.edu.ua.

Yuliia Khibovska - PhD student in Computer Science, Sumy State University, Sumy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5832-3134>, e-mail: y.khibovska@cs.sumdu.edu.ua.

Черній Олександр Анатолійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», старший викладач кафедри інжинірингу технічних систем, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0691-5829>, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.

Oleksandr Chernii - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Senior Lecturer of the Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0691-5829>, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.

Чигрин Антон Іванович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0244-0948>, e-mail: anton.chyhryn@pdau.edu.ua.

Anton Chyhryn - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0244-0948>, e-mail: anton.chyhryn@pdau.edu.ua.

Чумак Віталій Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com.

Vitalii Chumak - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com.

Чупринка Наталія Вікторівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8952-7567>, e-mail: chuprinka.nv@knutd.com.ua.

Nataliia Chuprynka - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Information and Computer Technologies, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8952-7567>, e-mail: chuprinka.nv@knutd.com.ua.

Шаконін Кіріл Євгенович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Сумський державний університет, м. Суми, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9771-7629>, e-mail: kirilshamonin@gmail.com.

Kiril Shamonin - PhD student in Computer Science, Sumy State University, Sumy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9771-7629>, e-mail: kirilshamonin@gmail.com.

Шалапко Денис Олегович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування, м. Херсон, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4311-3908>, e-mail: shalapko.denys@gmail.com.

Denys Shalapko – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Energy, Kherson Educational and Scientific Institute of the National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4311-3908>, e-mail: shalapko.denys@gmail.com.

Шелехов Ігор Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики та інформатики, Сумський національний аграрний університет; доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4304-7768>, e-mail: i.shelehov@snau.edu.ua.

Igor Shelehov - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Cybernetics and Informatics, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; Associate Professor at the Computer Science Department of Sumy State University, Sumy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4304-7768>, e-mail: i.shelehov@snau.edu.ua.

Шишацька Олена Володимирівна - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теорії та технології програмування факультету комп'ютерних наук та кібернетики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-8989>, e-mail: shyshatska@knu.ua.

Olena Shyshatska - Associate Professor, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Theory and Technology of Programming, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-8989>, e-mail: shyshatska@knu.ua.

Шишацький Андрій Вікторович - асистент кафедри теорії та технології програмування факультету комп'ютерних наук та кібернетики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5038-1110>, e-mail: ashyshatsky@knu.ua.

Andrii Shyshatsky - Assistant at the Department of Theory and Technology of Programming, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5038-1110>, e-mail: ashyshatsky@knu.ua.

Шльончак Ігор Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5096-2414>, e-mail: igor_shlionchak@ukr.net.

Igor Shlonchak - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Automobiles and Technology of Their Operation, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5096-2414>, e-mail: igor_shlionchak@ukr.net.

Щербина Кирил Костянтинович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-7686>, e-mail: kir2912s@ukr.net.

Kyryl Shcherbyna - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-7686>, e-mail: kir2912s@ukr.net.

Якименко Сергій Миколайович - доцент, кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри вищої математики та фізики, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5759-9603>, e-mail: yasm@i.ua.

Serhii Yakymenko - Associate Professor, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5759-9603>, e-mail: yasm@i.ua.

Яцун Володимир Васильович - доцент, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-0075>, e-mail: yatsun@i.ua.

Volodymyr Yatsun - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Construction, Road Machines and Civil Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-0075>, e-mail: yatsun@i.ua.

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожну формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. Постановка проблеми.
2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.
3. Постановка завдання (мета статті).
4. Виклад основного матеріалу.
5. Висновки і перспективи подальших досліджень.

Схема організації матеріалу статті:

1. Тематика*
2. УДК
3. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
4. Місце роботи, місто, країна. e-mail
5. Назва статті.
6. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури.
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.
11. Інформація про авторів.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Turnitin

Адреса для надсилання: zbimyk_tech@kntu.kr.ua

*** – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 208 Агроінженерія, 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами)**

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 12(43)
Частина I

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка О.П. Доренський

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.
25006, м. Кропивницький, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 29.09.2025р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 53,5
Тираж 300 прим. Зам. № 0872