

Науковий збірник



**Центральноукраїнський
науковий вісник
Технічні науки**

**Central Ukrainian Scientific Bulletin
Technical Sciences**

Випуск 12(43)

Частина II

**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 II**

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 II**

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 04 грудня 2025 року № 4.

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.; Дмитро УГРИН, д-р техн. наук, проф.; Геннадій ФІЛІМОНІХІН, д-р техн. наук, проф.; Ігор ШЕПЕЛЕНКО, д-р техн. наук, проф.; 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

- П. В. Віжесвський, О. С. Савенко*
Еволюційна адаптація політик DLP за умов дрейфу концепції у потокових даних 9-19
- А. Д. Каланча, Д. І. Угрин, О. П. Доренський, В. В. Литвин*
Метод інтегрального аналізу зв'язків між джерелами інформації
на основі часово-семантичних метрик..... 20-26
- О. В. Присяжнюк, А. В. Пузікова, Д. А. Оришечко*
Експериментальне дослідження ефективності моделі GPT-4o для оцінювання
якості користувацьких інтерфейсів із врахуванням безпекових ризиків 27-35
- Т. В. Смірнова, К. О. Буравченко, О. А. Добринчук,
С. А. Смірнов, Н. М. Якименко, О. А. Смірнов*
Хмарна технологія моніторингу ключових індикаторів ефективності
технологічних процесів у критичній інфраструктурі..... 36-54
- Д. І. Угрин, О. П. Доренський, О. Д. Іл'юк, Ю. О. Ушенко, К. С. Шкідіна*
Експериментальний аналіз ефективності глибоких нейронних мереж
для автоматизованої класифікації об'єктів за зображеннями МРТ 55-61

Кібербезпека та захист інформації

- О. І. Полотай, О. П. Доренський, А. С. Коваленко, К. О. Буравченко*
STRIDE-моделювання загроз кібербезпеці локальних комп'ютерних мереж 62-68

Шрикладна механіка

- І. Б. Гевко, Р. М. Рогатинський, О. Л. Ляшук, М. І. Пилипець,
І. Г. Ткаченко, Р. В. Комар*
Технологічне проєктування способів навівання широкосмугових
гвинтових спіралей обертовою втулкою 69-78
- О. С. Мусієнко, О. В. Білий*
Міцність виробів із PLA залежно від щільності заповнення
та орієнтації шарів при FDM-друці 79-86
- Г. Б. Філімоніхін, Ю. О. Сокальська, Ю. О. Остапчук,
Л. С. Олійніченко, В. В. Пирогов*
Обґрунтування методів визначення масової та аеродинамічної
незрівноваженості гвинта..... 87-101
- В. М. Шмельов*
Вилучення зламаного інструмента із застосуванням електроерозійної обробки..... 102-107
- К. К. Щербина, В. А. Годорожа, А. М. Кириченко*
Дослідження точності виготовлення зубчатого зачеплення
гідравлічних шестеренних насосів гр.3 108-116

Д. В. Янюк

Оцінка стабільності осевого позиціонування торця довгомірної
циліндричної заготовки при автоматичній подачі у верстаті..... 117-122

Матеріалознавство

С. В. Кирилаха

Перспективи застосування адитивних технологій для виготовлення
та відновлення зносостійких конструктивних елементів
у сучасному машинобудуванні та сільському господарстві..... 123-133

Ю. Г. Ковальов, В. В. Аулін, С. Г. Ковальов, О. В. Кузик, А. В. Гриньків

Штучний інтелект у матеріалознавчих дослідженнях:
тенденції, інструменти та трансформації 134-142

А. В. Рутковський, О. Г. Трапезон, С. І. Маркович, О. В. Бевз

Розробка методики для експериментального визначення втомної міцності
дослідних зразків з титанових сплавів з модифікованими поверхнями..... 143-147

М. М. Студент, О. Г. Лук'яненко, І. М. Погрелюк, С. І. Маркович, В. С. Труш

Антифрикційні властивості титанового сплаву ВТ6, зміцненого дифузійним
насиченням елементами втілення..... 148-153

Галузеве машинобудування

Е. Б. Алієв, І. В. Литвинов

Чисельне моделювання системи «сито – частинки матеріалу – щітка»..... 154-164

А. В. Бабій, Б. О. Блащак

Обґрунтування параметрів модуля підготовки ґрунту
картоплепосадочної машини 165-174

О. Л. Ляшук, В. З. Гудь, А. Є. Дячун, С. М. Паньків

Обґрунтування технологічних і конструктивно-кінематичних параметрів
гнучкого гвинтового конвеєра 175-187

Ю. А. Новицький

Дослідження надійності та періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів 188-195

Р. М. Рогатинський, М. І. Пилипець, І. Г. Ткаченко, М. Д. П'єнтас,

Т. М. Пелешок, П. О. Леськів

Особливості формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням
на циліндричній оправці..... 196-203

В. М. Чумак, Є. В. Манько, В. Г. Байцан, В. В. Аулін, С. В. Лисенко, А. В. Гриньків

Універсальний метод формалізації параметрів ресурсовизначальних
деталей транспортної та сільськогосподарської техніки
для систем предиктивного обслуговування 204-219

Автомобільний транспорт

В. П. Волков, І. О. Таран, В. А. Войтов, Т. В. Волкова, Н. Г. Бережна

Технологія контролю працездатного стану автомобілів в умовах експлуатації 220-235

<i>Ів. Б. Гевко, О. Л. Ляшук, Т. А. Довбуш, Р. В. Хорошун, Іг.Б. Гевко</i> Проектування трансформаційних причепів для оптимізації площ зберігання в автотранспортних підприємствах.....	236-243
<i>М. В. Красота, І. В. Шепеленко, Ю. В. Кулешков, Р. А. Осін, Т. В. Руденко, В. П. Петленко</i> Підвищення ефективності обслуговування та ремонту автомобілів використанням інформаційних технологій	244-250
<i>О. М. Лівіцький, В. В. Аулін, С. В. Харченко, А. М. Зайцев, В. В. Слонь</i> Адаптивне управління технічним станом і безпекою експлуатації транспортної техніки в агропромисловому виробництві.....	251-257
<i>А. І. Папінко, В. М. Мосьпан, М. Р. Башуцький, В. В. Бірючинський, О. І. Попович</i> Дослідження деформовано-напруженого стану несучої рами напівпричепів.....	258-265
<i>М. А. Подригало, А. В. Ужва, В. С. Шеїн</i> Використання масштабного моделювання для оцінки точності вимірювання параметрів автомобілів і двигунів у нестандартних умовах.....	266-273
<i>А. А. Сергійчук, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, Є. М. Козаченко</i> Міжлабораторні випробування як ефективний інструмент підвищення якості діагностики технічного стану колісних транспортних засобів у системі ISO 9001	274-283
<i>С. Ю. Тищенко, В. В. Аулін, А. В. Гриньків</i> Визначення елементів, які лімітують працездатність автомобілів групи Renault на основі статистичної інформації про відмови.....	284-294
<i>Цинь Сяосюань, Є. В. Любий</i> Теоретичні засади побудови алгоритму гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій	295-303
<i>О. П. Цьонь, У. М. Плекан</i> Оцінка споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів	304-312
Транспортні технології (за видами)	
<i>Д. В. Голуб, В. В. Аулін, Р. П. Кічура, О. Ю. Ювженко</i> Визначення сукупності факторів ефективності функціонування автомобільних транспортних систем математичними методами аналізу	313-320
<i>К. Г. Ковцур, І. І. Оленчук</i> Каршерінг як інструмент розвитку сталої міської мобільності (на прикладі м. Тернопіль)	321-330
<i>С. А. Сахно, Є. В. Любий, О. С. Колій</i> Аналіз стратегій формування маршрутних мереж міст	331-340
Інформація про авторів	341-353

CONTENT

Computer Science

<i>Petro Vizhevskiy, Oleg Savenko</i> Evolutionary Adaptation of DLP Policies under Concept Drift in Streaming Data	9-19
<i>Artem Kalancha, Dmytro Uhryn, Oleksandr Dorenskyi, Vasyl Lytvyn</i> Method of Integral Analysis of Relationships between Information Sources based on Temporal-Semantic Metrics	20-26
<i>Olena Prysiashniuk, Anna Puzikova, Dmytro Oryshechko</i> Experimental Study of the Effectiveness of the GPT-4o Model for Evaluating the Quality of User Interfaces with Consideration of Security Risks	27-35
<i>Tetiana Smirnova, Kostiantyn Buravchenko, Oleksandr Dobrynychuk, Serhii Smirnov, Nataliia Yakymenko, Oleksii Smirnov</i> Cloud-based Technology for Monitoring Key Performance Indicators of Technological Processes in Critical Infrastructure	36-54
<i>Dmytro Uhryn, Oleksandr Dorenskyi, Oleksii Iliuk, Yuriy Ushenko, Kateryna Shkidina</i> Experimental Analysis of Deep Neural Networks for Automated Object Classification Using MRI Images	55-61

Cybersecurity and Information Protection

<i>Orest Polotai, Oleksandr Dorenskyi, Anastasiia Kovalenko, Kostiantyn Buravchenko</i> STRIDE-based threat Modeling of Cybersecurity Risks in Local Computer Networks.....	62-68

Applied Mechanics

<i>Ivan Hevko, Roman Rohatynskiy, Oleg Lyashuk, Mykhailo Pylypets, Igor Tkachenko, Roman Komar</i> Technological Design of Methods for Winding Broadband Helical Coils With a Rotating Sleeve	69-78
<i>Olha Musiienko, Oleksandr Bilyi</i> Strength of PLA Products Depending on Fill Density and Layer Orientation in FDM Printing	79-86
<i>Gennadiy Filimonikhin, Yulia Ostapchuk, Yulia Sokalska, Lubov Olijnichenko, Volodymyr Pirogov</i> Justification of Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalances of a Propeller	87-101
<i>Vitalii Shmelov</i> Extraction of a Broken Tool with the Use of Electroerosion Processing	102-107
<i>Kyryl Shcherbyna, Viktor Hodorodozha, Andrii Kyrychenko</i> Research on the Manufacturing Precision of Gear Meshing in Group 3 Hydraulic Gear Pumps	108-116

Dmytro Yaniuk

Assessment of The Stability of the Axial Positioning of the End Face of a Long
Cylindrical Workpiece During Automatic Feeding in a Machine Tool 117-122

Material Science

Svitlana Kyrylakha

Prospects for the Application of Additive Technologies for Manufacturing
and Repair of Wear-Resistant Structural Components
in Modern Mechanical Engineering and Agriculture 123-133

Yurii Kovalov, Viktor Aulin, Serhii Kovalov, Oleksandr Kuzyk, Andrii Hrynkiv

Artificial Intelligence in Materials Research: Trends, Tools, and Transformations 134-142

Anatoly Rutkovskiy, Oleksandr Trapezon, Sergiy Markovych, Oleg Bevz

Development of a Technique for Experimental Determination of Fatigue Strength
of Test Samples of Titanium Alloys with Modified Surfaces 143-147

Mykhailo Student, Oleksandr Lukyanenko, Iryna Pohreluk,

Vasil Trush, Sergiy Markovych

Antifriction Properties of VT6 Titanium Alloy Strengthened by Diffusion Saturation
with Interstitial Elements 148-153

Industrial Machinery Engineering

Elchyn Aliiev, Illia Lytvynov

Numerical Simulation of the «Sieve – Material Particles – Brush» System 154-164

Andrii Babii, Bohdan Blashchak

Justification of the Parameters of the Soil Preparation Module
of the Potato Planting Machine 165-174

Oleg Lyashuk, Viktor Gud, Andrii Dyachun, Sergii Pankiv

Substitution of Technological and Constructive-Kinematic Parameters
of a Flexible Screw Conveyor 175-187

Yuri Novitskyi

Research on the Reliability and Frequency of Replacement of Engine Airfilters 188-195

Roman Rohatynskiy, Mykhailo Pylypets, Igor Tkachenko, Mariia Pientak,

Taras Peleshok, Palvo Leskiv

Features of Forming Screw and Tubular Profiles by Winding on a Cylindrical Mandrel 196-203

Vitaliy Chumak, Yehor Manko, Viktor Baitsan, Viktor Aulin,

Serhii Lysenko, Andrii Hrynkiv

A Universal Method for Formalizing Parameters of Resource-Determining
Parts of Transport and Agricultural Machinery for Predictive Maintenance Systems 204-219

Automobile Transport

Volodymyr Volkov, Ihor Taran, Viktor Vojtov, Tetiana Volkova, Nataliia Berezha

Technology for Controlling the Serviceable Condition of Vehicles in Operation 220-235

<i>Ivan Hevko, Oleg Lyashuk, Taras Dovbush, Igor Hevko, Roman Khoroshun</i> Design of Transformation Trailers to Optimize Storage Space in Trucking Companies.....	236-243
<i>Mykhailo Krasota, Igor Shepelenko, Yuriy Kuleshkov, Ruslan Osin, Timofii Rudenko, Volodymyr Petlenko</i> Increasing the Efficiency of Vehicle Maintenance and Repair using Information Technology.....	244-250
<i>Oleksandr Livytskyi, Victor Aulin, Serhii Kharchenko, Andrii Zaitsev, Victor Slon</i> Adaptive Management of the Technical Condition and Safety of Operation of Transport Equipment in Agro-Industrial Production	251-257
<i>Andrii Papinko, Valerii Mospan, Mykhailo Bashutsky, Vitaly Biryuchinsky, Oleksandr Popovych</i> Deformed-Stressed State of Semi-Trailer Bearing Frame.....	258-265
<i>Mykhailo Podryhalo, Anatolii Uzhva, Vitalii Shein</i> Using Scale Modeling to Assess the Accuracy of Measuring Parameters of Vehicles and Engines under Non-Standard Conditions	266-273
<i>Andrii Serhiichuk, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv, Yevhen Kozachenko</i> Interlaboratory Testing as an Effective Tool for Improving the Quality of Diagnostics of the Technical Condition of Wheeled Vehicles in the ISO 9001 System.....	274-283
<i>Serhii Tyshchenko, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv</i> Identification of Elements that Limit the Performance of Renault Group Vehicles Based on Statistical Information on Failures.....	284-294
<i>Xiaoxuan Qin, Yevhen Liubiyi</i> Theoretical Foundations for the Development of an Algorithm for Guaranteed Generation of Random Passenger Correspondence Matrices	295-303
<i>Oleg Tson, Uliana Plekan</i> Valuation of Consumer Properties of Freight Motor Vehicles	304-312
Transport Technologies (by Types)	
<i>Dmytro Holub, Viktor Aulin, Ruslan Kichura, Oleksandr Yuvzenko</i> Determination of the Set of Factors of Efficiency of Functioning of Automobile Transport Systems by Mathematical Methods of Analysis	313-320
<i>Kateryna Kovtsur, Illia Olenchuk</i> Carsharing as a Tool for Sustainable Urban Mobility Development (a Case Study of Ternopil).....	321-330
<i>Sakhno Serhii, Yevhen Liubiyi, Kolii Oleksandr</i> Analysis of Strategies for Developing Urban Route Networks	331-340
Information About Authors	341-353

УДК 004.03:004.45:004.75

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.9-19](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.9-19)**П. В. Віжевський, О. С. Савенко**, проф., д-р техн. наук*Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна**e-mail: vizhevskyipv@khmnu.edu.ua, savenko_oleg_st@ukr.net*

Еволюційна адаптація політик DLP за умов дрейфу концепції у потокових даних

У сучасних DLP-системах, що обробляють потокові дані у хмарних і гібридних середовищах, фіксовані політики швидко деградують через дрейф концепції. Оператори змушені одночасно утримувати ризик-зважену вартість пропусків на прийнятному рівні, обмежувати навантаження від хибних спрацювань, виконувати SLO за затримкою та забезпечувати стабільність тривог за жорстких бюджетів пам'яті й обчислень. Це створює суперечливі вимоги, які традиційні детектори або ручне тюнінгування політик вирішують неповною мірою. Робота пропонує онлайн-еволюційний метод адаптації політик, який формулює синхронне налаштування як багатокритеріальну оптимізацію за обмежених ресурсів. Застосовано хромосомне кодування політик, кероване дрейфом перемикання «дослідження/експлуатація», архів перевірених рішень для «теплих» стартів, компактну активну суміш та захищені відкочування для операційної безпеки. Експериментальна оцінка на восьми потоках (синтетичних і реальних) демонструє, що інтегральна вартість утримується в межах 0–3,5% від найкращого базового методу (середній абсолютний розрив $\approx 1,6\%$), дотримано $p95 < 100$ мс часу обробки, а мінливість частоти тривог знижено на 50–63%, при тому частота хибних спрацювань лишається співставною або нижчою. Виявлено дві чутливості: поріг «брами дрейфу», що керує балансом дослідження/експлуатації, і короткі обчислювальні сплески одразу після виявленої зміни. Їх пом'якшують архівні «теплі» старту, компактна суміш і бюджети на інтенсивність мутацій без втрати чутливості. **генетичні алгоритми, запобігання витоку даних, виявлення аномалій, дрейф концепції, хмарна безпека**

Постановка проблеми. Системи запобігання витоку даних (DLP) працюють у середовищах, де поведінка користувачів і характеристики трафіку постійно змінюються. Такі зсуви руйнують припущення про стаціонарність, спричиняють концептуальний дрейф, погіршують точність виявлення інцидентів і стабільність тривог у потокових сценаріях. У підсумку зростає навантаження на операторів і ризик пропуску критичних подій, що перетворює підтримання якості на безперервне завдання експлуатації. [1]. До цього додаються й практичні обмеження виробничих умов: невеликі допуски на затримку, високі вимоги до пропускної здатності, неповна або відкладена розмітка подій. Підтримувати працездатність виключно періодичним перенавчанням стає дедалі дорожче та повільніше. Виникає потреба в механізмах онлайн-адаптації, які б ураховували ресурсні обмеження та не зупиняли сервіс під час змін [2]. Щоб така адаптація була своєчасною, потрібні індикатори змінності, які є водночас інформативними та недорогими обчислювально. Одним із практичних сигналів виступає прогностична невизначеність моделей, що дозволяє фіксувати появу нових режимів даних ще до накопичення достатньої кількості міток [3]. У домені DLP додаткові труднощі породжує строката природа каналів передачі, сезонність бізнес-процесів і висока ціна помилкових спрацювань. Фіксовані пороги та статичні політики не витримують таких коливань, тому потрібні процедури спостереження і керованої реакції, здатні утримувати баланс між чутливістю й стабільністю [4]. Неправильний добір детекторів і порогів безпосередньо відгукується на вартості реагування. Тому рішення мають спиратися на відтворювані порівняння за різних типів дрейфу і режимів навантаження, щоб уникати прихованих упереджень і забезпечувати стабільність тривог [5].

Для об'єктивної оцінки таких рішень потрібні загальнодоступні колекції потокових наборів з чітко визначеними сценаріями змінності та узгодженими метриками. Це робить можливим коректне співставлення точності, стабільності та експлуатаційних витрат між різними реалізаціями [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки дослідження дрейфу концепції у потокових системах досягло помітної зрілості. Про це свідчить поява системних оглядів, які встановлюють спільну термінологію та вимоги до методів виявлення змін. Hinder зі співавторами у своїй оглядовій роботі детально розглянули питання моніторингу в середовищах, що еволюціонують, виокремивши ключові типи дрейфу та підходи до їхнього спостереження [1]. Така робота закладає понятійну основу для подальших прикладних рішень, адже без чіткого розуміння природи змінності важко обирати адекватні інструменти реагування.

У прикладному руслі окреслилися дві перспективні стратегії роботи з нестационарністю даних. Перша опирається на прогностичну невизначеність нейромережових моделей як сигнал раннього попередження про зміни. Baier та колеги показали, що зростання невизначеності передбачає дрейф ще до накопичення достатньої кількості розмічених прикладів – особливо цінно у реальному часі, коли мітки надходять із затримкою або зовсім відсутні [3]. Другий напрямок пропонує випереджальне моделювання майбутніх розподілів даних, щоб класифікатор заздалегідь готувався до очікуваних змін. Li зі співавторами запропонували метод DDG-DA, який генерує синтетичні дані для імітації ймовірних дрейфів і таким чином скорочує провали точності під час перехідних періодів [2].

Чимало зусиль дослідників спрямовано на створення надійних референтних умов для порівняння різних методів. de Barros і Santos провели масштабне зіставлення детекторів дрейфу, показавши, що стабільність тривоги залежить не лише від алгоритму, а й від налаштувань порогів і характеру змінності самих даних [5]. Ця робота підкреслює важливість стандартизованих протоколів оцінювання. Losing із колегами доповнили цю інфраструктуру, зібравши колекцію публічно доступних наборів потокових даних із різними типами дрейфу, що робить експерименти відтворюваними та дозволяє чесно порівнювати нові підходи з базовими [6].

На рівні класифікаційних алгоритмів домінують ансамблеві підходи, здатні адаптуватися без повної зупинки конвеєра обробки. Gomes та співавтори розробили Adaptive Random Forests, які динамічно поновлюють набір дерев у відповідь на зміни у вхідних даних, забезпечуючи стабільну точність навіть за частих дрейфів [7]. Cano і Krawczyk пішли далі, запропонувавши спочатку Карпа Updated Ensemble для загального випадку потокових класифікацій [8], а згодом – ROSE, спеціально налаштований на роботу з дисбалансованими класами та складними поєднаннями раптових і поступових зсувів [9]. Ці рішення демонструють, як багатомодельна архітектура підвищує стійкість системи до непередбачуваних змін.

Швидкість реагування на дрейф також привернула значну увагу. Mahdi зі співавторами розглянули випадок, коли позначки класів відсутні, а система має миттєво відреагувати на появу нових режимів поведінки [10]. Їхній підхід дозволяє виявляти зміни на ранніх стадіях і ініціювати адаптацію до того, як відбудеться істотне погіршення якості. У близькому контексті В близькому контексті Adams та колеги зосередилися на поясненні дрейфу, намагаючись зробити процес виявлення змін прозорішим для експертів і операторів – критично важливо у системах із високою ціною помилок [11].

Еволюційні підходи до адаптації представляють окрему гілку досліджень. Ghomeshi із колегами запропонували метод EACD, який використовує еволюційні

механізми для пошуку оптимальних конфігурацій моделі в умовах змінності даних, уникаючи дорогих повних перенавчань і зберігаючи різноманітність варіантів політик [12]. Такий підхід особливо корисний у багатокритеріальних задачах, де потрібно збалансувати точність, швидкість і витрати на обчислення. Її та співавтори розширили цю ідею на онлайн-буст-алгоритм, який поєднує адаптивне навчання з мульти-поточною класифікацією, що дає змогу ефективно обробляти паралельні джерела даних [13].

Останні роботи також звертають увагу на архітектурні аспекти виявлення дрейфу. Її зі співавторами застосували глибокі нейронні мережі та автокодувальники для детекції змін, показавши, що такі моделі можуть виявляти складні, нелінійні зсуви у високорозмірних просторах ознак [14]. Це розширює арсенал інструментів для роботи з неочевидними формами дрейфу, які важко вловити традиційними статистичними тестами.

У контексті систем запобігання витоку даних питання адаптації до дрейфу набувають додаткової ваги через специфіку предметної області. Alneyadi зі співавторами у своєму огляді DLP-систем підкреслили, що успішна робота таких рішень залежить не лише від якості моделей, а й від керованості процесів оновлення політик, контролю ризиків, пов'язаних із самою адаптацією, та прозорості ухвалення рішень [4]. Будь-які зміни в конфігурації потенційно можуть привести до появи нових каналів витоку або послабити захист. Тому механізми онлайн-адаптації повинні включати аудит, відкат до попередніх станів та чітку верифікацію безпеки оновлень.

Попри успіхи у виявленні дрейфу, алгоритмічній адаптації та стандартизації оцінювання, поєднання цих компонентів у єдиний механізм для DLP-систем не є досконало дослідженим. Серед доступних наукових робіт зазвичай розглядаються окремі аспекти: моніторинг змін, ансамблеві методи або еволюційний пошук, але рідко вони об'єднуються в цілісне рішення. Актуальність даної роботи заключається в розробці комплексного рішення з керованими ресурсними обмеженнями, багатокритеріальною оптимізацією та архівним механізмом безпечного відкочування. Таке рішення буде враховувати специфіку поточних середовищ з високими вимогами до безпеки і надійності в експлуатації.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробці та перевірці методу онлайн-еволюційної адаптації політик для систем запобігання витоку даних (DLP). Його розробка включає в себе:

- формалізування моделі оптимізації DLP-політик, що складається з ризик-зваженої вартості пропущених витоків, навантаження від хибних спрацювань, час на прийняття рішення, складність політики та стабільність частоти тривог з урахуванням експлуатаційних обмежень;
- розробка механізму кодування хромосом політик, що включає адаптивну стратегію перемикавання режимів еволюційного пошуку залежно від неконтрольованих індикаторів дрейфу концепції (динаміка невизначеності моделі, прогнозовані зсуви розподілів, маркери змін у латентному просторі);
- створення архівного механізму керованих відкочувань до перевірених політик минулих режимів та використання зваженої суміші різних активних політик для підтримки стійкості до повторюваних патернів дрейфу;
- проведення експериментального оцінювання на поточних наборах даних із різними типами дрейфу з колекції driftDatasets [6], порівнюючи розроблений метод з базовими детекторами (ADWIN, DDM, EDDM, UDD) за інтегральною вартістю, стабільністю тривог та при дотриманні SLO.

Реалізація поставлених завдань сприятиме створенню науково обґрунтованого методу онлайн-адаптації DLP-систем, здатного підтримувати баланс між точністю

виявлення інцидентів, стабільністю тривог та ресурсними обмеженнями у нестационарних середовищах.

Виклад основного матеріалу. Потік подій трактується як послідовність документів/повідомлень із контекстом каналу та ролі користувача. Щоб уніфікувати опис, запровадимо ризиковий скор, порогову політику прийняття рішень, подієву вартість, формальне означення дрейфу, багатометову ціль і експлуатаційні обмеження.

$$s_t = f_\theta(x_t, m_t) \in [0, 1], \quad (1)$$

де $x_t \in \mathbb{R}^d$ – ознаки події/документа в момент t , $m_t \in \mathcal{M}$ – контекст (канал, роль, час, географія тощо), $f_\theta(\cdot)$ – скоринг-функція з параметрами політики θ , s_t – ризиковий скор (ступінь/ймовірність ризику витоку).

Рішення приймається порогово, що дозволяє узгодити точність і вартість втручань.

$$a_t = \begin{cases} allow, & \text{якщо } s_t < \tau_q, \\ quarantine, & \text{якщо } \tau_q \leq s_t < \tau_b, \\ block, & \text{якщо } s_t \geq \tau_b, \end{cases} \quad (2)$$

де $a_t \in \mathcal{A} = allow, quarantine, block$ – дія політики; τ_q, τ_b ($0 \leq \tau_q \leq \tau_b \leq 1$) – пороги прийняття рішень.

Важливою є сервісна затримка – час від надходження події до застосування дії.

$$\ell_t(\theta) = t_{out} - t_{in}, \quad (3)$$

$\ell_t(\theta)$ – час обробки події t , t_{in} – час надходження події, t_{out} – час винесення дії a_t .

Щоб коректно зважити наслідки інцидентів, вводимо коефіцієнт ризику, що враховує чутливість вмісту, канал і роль.

$$\varphi(m_t, x_t) = s(x_t) \cdot \gamma_{chan}(m_t) \cdot \gamma_{role}(m_t), \quad (4)$$

де: $\varphi(\cdot)$ – ваговий коефіцієнт ризику інциденту, $s(x_t) \in [0, 1]$ – чутливість вмісту, $\gamma_{chan}(m_t) > 0$ – вага каналу (e-mail, чат, хмара тощо), $\gamma_{role}(m_t) > 0$ – вага ролі/ідентичності.

Подієва вартість інтегрує ризик пропущеного витоку, хибні спрацювання, час обробки і складність політики.

$$c_t(\theta) = \lambda_{FN} \cdot 1\{y_t = 1, a_t = allow\} \cdot \varphi(m_t, x_t) + \lambda_{FP} \cdot 1\{y_t = 0, a_t \in quarantine, block\} + \lambda_{LAT} \cdot \ell_t(\theta) + \lambda_{OPS} \cdot \kappa(\theta), \quad (5)$$

де $c_t(\theta)$ – подієва вартість, $y_t \in 0, 1$ – істинна мітка (1 = витік), може надходити із затримкою/бути відсутньою, $\lambda_{FN}, \lambda_{FP}, \lambda_{LAT}, \lambda_{OPS} > 0$ – ваги витрат за пропуск витоку, хибні спрацювання, час обробки та операційну складність, $\kappa(\theta) \geq 0$ – міра складності політики (напр., кількість правил/довжина виразу), $1 \cdot \{ \}$ – індикаторна функція.

Для оцінки продуктивності на відрізу часу використаємо середню (очікувану) вартість.

$$\bar{C}_T(\theta) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbb{E}[c_t(\theta)], \quad (6)$$

де $\bar{C}_T(\theta)$ – середня (очікувана) вартість на горизонті T , T – довжина інтервалу оцінювання, $\mathbb{E}[\cdot]$ – математичне сподівання (за випадковістю потоків/міток).

Керування шумністю операцій досягається контролем інтенсивності тривог і їх дисперсії.

$$\sigma_{alert,W}^2(\theta) = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} \left(A_{t-i}(\theta) - \bar{A}_{t,W}(\theta) \right)^2, \quad (7)$$

$$\bar{A}_{t,W}(\theta) = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} A_{t-i}(\theta),$$

де $A_t(\theta) \in 0,1$ – індикатор наявності тривоги (quarantine/block) для події t , W – розмір ковзаючого вікна, $\sigma_{alert,W}^2$ – дисперсія частоти тривог у вікні, $\bar{A}_{t,W}$ – середня частота тривог у вікні.

Дрейф концепції визначаємо як статистично значущу зміну розподілу даних, у неконтрольованих сценаріях використовуємо проксі через невизначеність моделі.

$$driftatt \Leftrightarrow D(P_t(x_t, y_t) \parallel P_{t-\Delta}(x_t, y_t)) > \delta, \quad (8)$$

де P_t – розподіл (x_t, y_t) у момент t , Δ – часовий крок порівняння, $D(\cdot \parallel \cdot)$ – обрана дивергенція/відстань між розподілами (напр., KL, Hellinger, MMD), $\delta > 0$ – поріг дрейфу. Без контролю: $D(P_t(u_t) \parallel P_{t-\Delta}(u_t)) > \delta$, де u_t – проксі-невизначеність моделі (ентропія/дисперсія прогнозів).

Оптимізаційна постановка розкладається на кілька цілей: ризик пропуску витоків, FP-навантаження, часову затримку на обробку події, складність політики та стабільність тривог.

$$J_1(\theta) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \lambda_{FN} \cdot 1\{y_t = 1, a_t = allow\} \cdot \varphi(m_t, x_t),$$

$$J_2(\theta) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \lambda_{FP} \cdot 1\{y_t = 0, a_t \in \{quarantine, block\}\}, \quad (9)$$

$$J_3(\theta) = p95(\ell_t(\theta)_{t=1}^T), \quad J_4(\theta) = \kappa(\theta), \quad J_5(\theta) = \sigma_{aert,W}^2 l(\theta),$$

де J_1 – складова очікуваної вартості, пов'язана з пропущеними витокami (ризик-зважена), J_2 – складова витрат за хибні спрацювання, J_3 – 95-й перцентиль часу обробки події, $p95(\cdot)$ – оператор 95-го перцентилля, J_4 – штраф за складність політики, J_5 – штраф за нестабільність тривог.

Для практичного керування компромісами зручно застосувати скаляризацію або безпосередню Парето-оптимізацію.

$$F(\theta) = w_1 J_1(\theta) + w_2 J_2(\theta) + w_3 J_3(\theta) + w_4 J_4(\theta) + w_5 J_5(\theta), \quad (10)$$

$$F(\theta) \rightarrow \min_{\theta \in \Theta},$$

де $F(\theta)$ – скаляризована ціль, $w_i > 0$ – ваги цілей, Θ – допустима множина параметрів політики/скорера.

Експлуатаційні обмеження відображають SLO на затримку, а також бюджети пам'яті та обчислень, характерні для реальних DLP-пайплайнів.

$$P(\ell_t(\theta) \leq L_{max}) \geq 1 - \varepsilon, \quad M(\theta) \leq M_{max},$$

$$\bar{\chi}(\theta) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \chi_t(\theta) \leq B_{max}, \quad (11)$$

де L_{max} – SLO-пори́г на час обробки події, ε – допустима частка порушень SLO, $M(\theta)$ – споживання пам'яті системою політик, $\chi_t(\theta)$ – обчислювальна вартість на подію t , $\bar{\chi}(\theta)$ – середня обчислювальна вартість, B_{max} – бюджет обчислень/часу.

Оптимізаційна задача онлайнної еволюції параметрів політики, яка поєднує точність, стабільність і ресурси, та розв'язується в умовах дрейфу концепції: знайти $\theta^* = \min_{\theta \in \Theta} F(\theta)$ за умов (11) та онлайнно еволюціонувати θ на потоці $S = (x_t, m_t)$.

Під «визначенням дрейфу» розуміємо сигнал від зовнішнього детектора, який може працювати у контрольованому або неконтрольованому режимі. Метод не зупиняє сервіс, працює у ковзних вікнах і поважає обмеження продуктивності, що є типовими для DLP-пайплайнів.

Хромосома відбиває рішення про те, як саме система реагує на ризикові події, та з яких правил складається політика. Фіксована частина контролює роботу на рівні порогів, вікон, інтенсивностей мутації та параметрів детектора дрейфу. Змінна частина описує набір правил і їхні ваги. Початкова популяція ініціалізується з наявних у організації політик, а також випадковими легальними конфігураціями, щоб забезпечити різноманіття.

$$\chi = [\tau_q, \tau_b, W, \rho, \eta, \mu_0, \mu_1, \psi, u_1, \dots, u_L], \quad (12)$$

де χ – хромосома, τ_q, τ_b – пороги з формули (2), W – розмір ковзного вікна для оцінювання, $\rho \in (0,1)$ – коефіцієнт експоненційного забування, $\eta > 0$ – крок оновлення ваг у механізмах пам'яті, $\mu_0, \mu_1 \geq 0$ – базова та додаткова інтенсивності мутації, ψ – параметри чутливості детектора дрейфу, u_i – гени правил із вагами, $L \leq L_{max}$ – кількість генів правил.

Правило u_i кодує умовний вираз на ознаках і контексті (наприклад: «канал = e-mail; роль = HR; збіг шаблону IBAN»), а також цільову дію та вагу. Щоб стримати зростання довжини виразів, застосовується обмеження L_{max} і штраф у функції якості на складність (J_4 з формули (9)). Під час ініціалізації дотримується інваріант $\tau_q \leq \tau_b$, для чого використовуємо проєкцію на допустиму область після мутацій.

Якість кандидатів оцінюється у мікрівікнах, що дозволяє відслідковувати короткотермінову динаміку та не накопичувати застарілу статистику. Рекомендовано обирати W з урахуванням середнього часу реагування на інциденти та обсягу трафіку. Усі компоненти якості доступні у потоковій формі: р95 часу обробки події рахуємо приблизними порядковими статистиками, стабільність тривог – одночасно з оновленням індикатора A_t .

$$F_k(\chi) = w_1 J_{1,k}(\chi) + w_2 J_{2,k}(\chi) + w_3 J_{3,k}(\chi) + w_4 J_{4,k}(\chi) + w_5 J_{5,k}(\chi), \quad (13)$$

де $F_k(\chi)$ – значення цілі у вікні I_k , $J_{j,k}$ – компоненти (9), обчислені на I_k , $w_j > 0$ – ваги цілей. Останні вікна важать більше завдяки експоненційному забуванню. Цим керує параметр ρ : за малих ρ метод швидше реагує, але стає менш стабільним. $\tilde{F}_t(\chi)$ – згортка якості за останні K вікон з коефіцієнтом забування ρ , K – кількість вікон в агрегуванні.

$$\tilde{F}_t(\chi) = \frac{\sum_{k=1}^K \rho^{K-k} F_k(\chi)}{\sum_{k=1}^K \rho^{K-k}}. \quad (14)$$

Алгоритм працює по вікнах. На початку вікна отримуємо сигнал z_k від детектора. Якщо у середовищі відбулася значуща зміна, збільшуємо інтенсивність мутацій, розширюємо пошук і тимчасово зменшуємо вплив штрафів за складність.

Якщо зміни не визначено, працюємо у консервативному режимі, що мінімізує коливання частоти тривоги.

$$\mu_k = \mu_0 + \mu_1 z_k, \quad (15)$$

де μ_k – інтенсивність мутації у вікні k , $z_k \in 0,1$ – бінарний сигнал від детектора дрейфу у вікні k (1 якщо подію зміни виявлено, 0 інакше), μ_0, μ_1 – параметри з (12).

$$p_i = \frac{\exp(-\beta \tilde{F}_t(\chi_i))}{\sum_{j=1..N} \exp(-\beta \tilde{F}_t(\chi_j))}, \quad (16)$$

де p_i – імовірність вибору хромосоми χ_i як батьківської, $\beta > 0$ – параметр селекційного тиску, N – розмір популяції.

Практично це означає, що у періоди стабільності нові кандидати мало відрізняються від поточних лідерів, а за сигналу про зміну з'являються «віддалені» варіанти, здатні швидше пристосуватися.

Практично це означає, що у періоди стабільності нові кандидати мало відрізняються від поточних лідерів, а за сигналу про зміну з'являються «віддалені» варіанти, здатні швидше пристосуватися.

Кросовер поєднує частини двох успішних рішень. Це переносить корисні фрагменти політик між кандидатами, зберігаючи сумісність структур.

$$\chi' = [\chi_{1:j}^A, \chi_{j+1:L}^B], \quad \chi'' = [\chi_{1:j}^B, \chi_{j+1:L}^A], \quad (17)$$

де χ^A, χ^B – батьківські хромосоми, j – точка кросоверу, L – довжина кодування, χ', χ'' – нащадки. Мутації порогів виконуються у межах допустимих діапазонів, щоб не порушити інваріант $\tau_q \leq \tau_b$. Відсікання після додавання шуму гарантує коректність.

$$\tau'_q = [\tau_q + \sigma_q \varepsilon_1]_0^{\tau_b}, \quad \tau'_b = [\tau_b + \sigma_b \varepsilon_2]_{\tau'_q}^1, \quad (18)$$

де τ'_q, τ'_b – мутовані пороги, $\sigma_q, \sigma_b > 0$ – масштаби шуму, $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \sim \mathcal{N}(0,1)$, $[\cdot]_a^b$ – відсікання до інтервалу.

Ваги правил змінюються адаптивно. Крок пропорційний μ_k , тому у періоди визначеного дрейфу пошук активніший.

$$w'_r = [w_r + \alpha_k \varepsilon_r]_0^{w_{max}}, \quad (19)$$

де w_r – вага r -го правила у гені u_i , w'_r – мутована вага, $\alpha_k = c\mu_k$ – адаптивний крок, $c > 0$ – константа масштабу, $\varepsilon_r \sim \mathcal{N}(0,1)$, w_{max} – верхня межа ваги.

Кількість правил у політиці може змінюватися. У стабільні періоди довжина коду утримується близько до поточного значення, під час змін дозволяється додати або видалити правило.

$$L' = L + \xi_k, \quad \xi_k \in -1, 0, +1, \quad (20)$$

де L' – нова кількість генів правил, ξ_k – випадкова зміна довжини зі схильністю до 0 у стаціонарі та до ± 1 за сигналу від детектора; імовірності залежать від μ_k , L обмежено $[0, L_{max}]$.

Дрейф часто має повторюваний характер. Архів дає змогу швидко повернути перевірену політику, якщо середовище повертається до попереднього стану. Паралельно підтримуємо набір із кількох політик, що зменшує ризик просідань на локальних зсувах.

$$\pi_j(t+1) = \frac{\pi_j(t) \exp(-\eta \tilde{F}_t(\chi_j))}{\sum_{m=1}^M \pi_m(t) \exp(-\eta \tilde{F}_t(\chi_m))}, \quad (21)$$

де $\pi_j(t)$ – вага j -ї політики в наборі на час t , M – кількість активних політик в наборі.

Щоб уникнути затяжних деградацій, перевіряємо, чи не стало гірше від останньої архівної опори на значущу величину. Якщо так, виконуємо кероване відкочування.

$$r_k = F_k(\chi_{cur}) - F_k(\chi_{arch}) > \delta_{rec}, \quad (22)$$

де r_k – різниця вартостей між поточною політикою χ_{cur} і найкращою архівною χ_{arch} у вікні k , $\delta_{rec} > 0$ – поріг відкочування. Розмір архіву вибирається з урахуванням пам'яті та різноманіття історичних станів. Практично доцільно тримати кілька останніх політик із найнижчою $\tilde{F}_t$ та невисокою кореляцією рішень.

Будь-який кандидат має відповідати сервісним вимогам. Це перевіряється до розгортання. За потреби використовується «тіньовий» режим або канарейкове розгортання, що знижує ризик.

$$I_{acc}(\chi) = 1\{P(\ell_t(\chi) \leq L_{max}) \geq 1 - \varepsilon \wedge M(\chi) \leq M_{max} \wedge \tilde{\chi} \leq B_{max}\}, \quad (23)$$

де $I_{acc}(\chi) \in 0,1$ – індикатор прийнятності, ℓ_t , L_{max} , ε , $M(\cdot)$, $\tilde{\chi}(\cdot)$, B_{max} – як у формулі (11). Ймовірнісний контроль затримки оцінюємо емпірично на ковзному вікні. Пам'ять і обчислення вимірюємо профайлінгом, що входить у конвеєр оцінювання.

Узагальнений цикл роботи:

1. На початку кожного вікна обчислюємо F_k для активних політик і оновлюємо згортку $\tilde{F}_t$ за (14).

2. Отримуємо сигнал z_k від детектора та встановлюємо μ_k за (15).

3. Виконуємо селекцію за (16), кросовер за (17) і мутації за (18)–(20).

4. Перераховуємо ваги суміші за (21).

5. Перевіряємо умову відкочування (22) і прийнятність за SLO та бюджетами (23).

6. В реальному середовищі використовується найкраща політика або суміш із вагами $\pi_j(t)$, інші кандидати залишаються у популяції для наступних ітерацій.

Такий цикл дає адаптацію «на льоту»: за неконтрольованого визначення дрейфу ми підсилюємо пошук без залучення міток, а за контрольованого – використовуємо обмежені мітки для підтвердження змін і калібрування порогів. Поєднання архіву, суміші політик і адаптивних мутацій утримує баланс між якістю виявлення ризику, стабільністю тривоги та вимогами продуктивності.

Мета експерименту полягає у перевірці того, чи зменшує онлайнова еволюційна адаптація політик інтегральну вартість $\tilde{F}_t$ на потоках з різними типами дрейфу та чи утримуються сервісні обмеження на затримку, пам'ять і обчислення. Оцінювання виконується у режимі test-then-train з ковзними вікнами та експоненційним забуванням. Дані беруться зі стандартної колекції driftDatasets [6] (SEA, Rotating Hyperplane, Moving/Interchanging RBF, Mixed Drift, Transient Chessboard, Electricity, Weather).

Синтетичні потоки використовуються для вимірювання затримки визначення змін, частоти хибних визначень і частки пропусків при відомих моментах дрейфу. Реальні потоки Electricity та Weather застосовуються для оцінювання в умовах сезонностей та структурних зсувів. Базові довжини ковзного вікна: $W \in \{256, 512, 1024\}$ для синтетики, для ELEC і Weather використовуємо $W = \{512, 1024\}$.

Коефіцієнт забування $\rho \in [0.85, 0.98]$ підбирається на стабільних префіксах кожного потоку. Усі методи дотримуються однакових ресурсних бюджетів: р95-затримка $L_{max}=200$ мс; пікова пам'ять $M_{max}=1024$ МБ; середні обчислення на подію $B_{max}=5.0$ мс; максимальна довжина вікна $W_{max}=1024$. Ці значення однакові для всіх методів і потоків та застосовуються під час перевірки прийнятності політики за правилом.

Порівнюємо наш підхід з ADWIN, DDM, EDDM і неконтрольованим UDD (визначення змін за невизначеністю моделі). Для ADWIN калібруємо δ на стаціонарному відрізку, щоб вирівняти частоту хибних визначень на рівні $\alpha=0.05$. Для DDM застосовуємо пороги $p_{min} + 2s_{min}$ (попередження) та $p_{min} + 3s_{min}$ (дрейф) з буфером не менше 1000 подій. Для EDDM використовуємо мінімальну відстань між помилками 30 та стандартні пороги на індикаторах. У UDD індикатором слугує EWMA-згладжена невизначеність моделі з $\lambda \in [0.05, 0.3]$ та порогом $h \in [2.5, 4.0]$. Для нашого методу: розмір популяції $N \in \{16, 32, 64\}$, селекційний тиск $\beta \in [0.5, 4]$, інтенсивності мутацій $\mu_0 \in [0.01, 0.1]$, $\mu_1 \in [0.05, 0.3]$, кількість активних політик у суміші $M \in \{2, 3, 5\}$; ваги цілей $(w_1, \dots, w_5)$ нормалізовані до 1.

Міряли інтегральну вартість $\tilde{F}_t$, стандартне відхилення частоти тривоги σ_A та хибні сповіщення на 10 000 подій (FA/10k). У таблиці 1 подано порівняння нашого методу з найкращим серед базових на кожному наборі даних.

Таблиця 1 – Порівняння з базовими методами

Набір	Тип дрейфу	Найкращий базовий метод	$\Delta \tilde{F}_t$	$\Delta \sigma_{alert}$	$\Delta \text{FA}/10k$
SEA Concepts	Раптовий (повторюваний)	DDM	+3.5%	-60.3%	+2.4%
Rotating Hyperplane	Поступовий	EDDM	+1.0%	-58.2%	+5.4%
Moving RBF	Інкрементальний	EDDM	-1.9%	-53.7%	-7.7%
Interchanging RBF	Раптовий (каскад)	DDM	+1.6%	-65.2%	-7.3%
Mixed Drift	Змішаний	EDDM	+0.0%	-52.8%	-2.5%
Transient Chessboard	Віртуальний + раптовий	ADWIN	+2.6%	-71.6%	+2.0%
Electricity (ELEC)	Сезонний/структурний	UDD	-0.4%	-57.4%	-7.8%
Weather (Offutt AFB)	Сезонний/трендовий	UDD	+0.9%	-63.4%	-6.8%

Джерело: розроблено авторами

Наш метод забезпечує конкурентну інтегральну вартість (на більшості потоків у межах 0–2% від найкращих базових підходів) і суттєво знижує стандартне відхилення частоти тривоги. За раптового дрейфу (SEA, Interchanging RBF) ми отримуємо значення σ_{alert} на 60% нижчі за базові. За поступового дрейфу (Rotating Hyperplane, Moving RBF) метод забезпечує на 50–58% кращу стабільність. Для змішаного та віртуального дрейфу (Mixed Drift, Transient Chessboard) еволюційний підхід дає на 53–59% нижчу σ_{alert} . Реальні потоки (Electricity, Weather) демонструють 57–63% зменшення стандартного відхилення частоти тривоги при використанні нашого методу, що свідчить про те, що механізм архіву допомагає уникати коливань між режимами. Загалом на всіх потоках стабільність тривоги поліпшується до 63%, а рівень хибних сповіщень подібний або менший порівняно з базовими.

Метод оперативно реагує на раптові та поступові/інкрементальні зсуви без надмірної корекції, зберігаючи паритет за вартістю та уникаючи тривалих постдрифтових коливань. За метрикою FA/10k метод кращий на 5 із 8 потоків і перебуває в межах незначного відхилення на решті; у поєднанні зі зниженням мінливості це означає менше піків зайвих сповіщень і меншу втому аналітиків.

Висновки. Показано, що за реалістичних обмежень потокової обробки еволюційний метод здатний збалансувати конкуруючі цілі DLP: ризик-зважену вартість виявлення, навантаження від хибних спрацювань, затримку та стабільність

тривог. У розглянутих синтетичних і реальних потоках інтегральна вартість утримується в межах 0–3.5% від найкращого базового методу, середній абсолютний розрив близько 1.6%. Операційно важливо, що протягом експериментів дотримано SLO на час обробки $p95 \leq 200$ мс, а стандартне відхилення частоти тривог зменшується орієнтовно на 50–63%, що скорочує пікові навантаження на аналітиків.

Виявлено дві практичні чутливості. По-перше, налаштування «брами дрейфу», яка керує перемиканням між дослідженням і експлуатацією: надмірна чутливість може спричинити короточасні підвищення FA, надто консервативні пороги сповільнюють адаптацію за швидких зсувів. По-друге, після зафіксованого дрейфу можливе короточасне збільшення часу обробки подій, хоча середнє значення і $p95$ залишаються в межах бюджету. Ці ефекти пом'якшуються «теплим стартом» з архіву перевірених політик, компактною сумішшю активних політик та підбором бюджетів на інтенсивність мутацій, який не спричиняє втрати чутливості.

Практичне впровадження потребує використання методу між етапами збору даних і застосування політик, опираючись на потокові дані телеметрії електронної пошти, проксі серверів, компонентів рівня хосту. Оновлення політик впроваджується через оркестраційний шар із хуками для відкочування. Рекомендована траєкторія розгортання оновлених політик: тіньовий режим із моніторингом $\tilde{F}_t$ і SLO, далі канаркове увімкнення в обмежених доменах, з подальшим розгортанням на усю систему. Індикатор прийнятності $I_{acc}(\chi)$ має слугувати «воротами якості», автоматично відхиляючи кандидатів або виконуючи відкочування у разі порушення бюджету. Необхідно мінімізовувати використання реальних даних, натомість використовуючи агреговані ознаки та аудитні журнали (без чутливого контенту).

Подальша робота включає онлайнний контроль розміру вікна та коефіцієнта забування, додавання доменно-обізнаних сигналів для більш стаціонарної частоти тривог при збереженні вартості й SLO, бюджетоване добування міток у напів/неконтрольованих сценаріях, перехід від скаляризації до Парето-оптимізації та дослідження нейросимвольних подань правил із широкою оцінкою на корпоративній телеметрії. Сукупно результати підтверджують доцільність еволюційних алгоритмів як практичного інструмента стійкої та прозорої адаптації DLP у середовищах із дрейфом концепції.

Список літератури

1. Hinder F., Vaquet V., Hammer B. One or two things we know about concept drift – A survey on monitoring in evolving environments. Part A: Detecting concept drift. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 7. Art. 1330257. DOI: <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1330257>.
2. Li W., Yang X., Liu W., Xia Y., Bian J. DDG-DA: Data Distribution Generation for Predictable Concept Drift Adaptation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 36, № 4. C. 4092–4100. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i4.20327>.
3. Baier L., Schlör T., Schöffel J., Kühl N. Detecting Concept Drift with Neural Network Model Uncertainty. *arXiv preprint*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.01873>.
4. Alneyadi S., Sithirasanen E., Muthukumarasamy V. A Survey on Data Leakage Prevention Systems. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. Vol. 62. C. 137–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.01.008>.
5. de Barros R. S. M., Santos S. G. T. C. A Large-Scale Comparison of Concept Drift Detectors. *Information Sciences*. 2018. Vol. 451–452. C. 348–370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.04.014>.
6. Losing V., Hammer B., Wersing H. Drift Datasets. *GitHub repository*. 2025. URL: <https://github.com/vlosing/driftDatasets> (дата звернення: 05.11.2025).
7. Gomes H. M., Bifet A., Read J., Barddal J. P., Enembreck F., Pfahringer B., Holmes G., Abdesslem T. Adaptive Random Forests for Evolving Data Stream Classification. *Machine Learning*. 2017. Vol. 106. C. 1469–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-017-5642-8>.
8. Cano A., Krawczyk B. Kappa Updated Ensemble for Drifting Data Stream Mining. *Machine Learning*. 2020. Vol. 109. C. 175–218. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05840-z>.
9. Cano A., Krawczyk B. ROSE: Robust Online Self-Adjusting Ensemble for Continual Learning on Imbalanced Drifting Data Streams. *Machine Learning*. 2022. Vol. 111. C. 2561–2599. DOI: doi.org/10.1007/s10994-022-06168-x.
10. Mahdi O. A., Pardede E., Ali N., Cao J. Fast Reaction to Sudden Concept Drift in the Absence of Class Labels. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 2. Art. 606. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020606>.
11. Adams J. N., van Zelst S. J., Rose T., van der Aalst W. M. P. Explainable Concept Drift in Process Mining. *Information Systems*. 2023. Vol. 114. Art. 102177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.is.2023.102177>.

12. Ghomeshi H., Gaber M. M., Kovalchuk Y. EACD: Evolutionary Adaptation to Concept Drifts in Data Streams. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2019. Vol. 33. C. 760–793. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00614-6>.
13. Yu E., Lu J., Zhang B., Zhang G. Online Boosting Adaptive Learning under Concept Drift for Multistream Classification. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 38, № 15. C. 16522–16530. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v38i15.29590>.
14. Hu L., Lu Y., Feng Y. Concept Drift Detection Based on Deep Neural Networks and Autoencoders. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 6. Art. 3056. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15063056>.

References

1. Hinder, F., Vaquet, V., & Hammer, B. (2024). One or two things we know about concept drift – A survey on monitoring in evolving environments. Part A: Detecting concept drift. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, Article 1330257. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1330257>.
2. Li, W., Yang, X., Liu, W., Xia, Y., & Bian, J. (2022). DDG-DA: Data distribution generation for predictable concept drift adaptation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36(4), 4092–4100. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i4.20327>.
3. Baier, L., Schlör, T., Schöffner, J., & Kühl, N. (2021). Detecting concept drift with neural network model uncertainty. *arXiv preprint arXiv:2107.01873*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.01873>.
4. Alneyadi, S., Sithirasanen, E., & Muthukumarasamy, V. (2016). A survey on data leakage prevention systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 62, 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.01.008>.
5. de Barros, R. S. M., & Santos, S. G. T. C. (2018). A large-scale comparison of concept drift detectors. *Information Sciences*, 451–452, 348–370. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.04.014>.
6. Losing, V., Hammer, B., & Wersing, H. (n.d.). Drift datasets. *GitHub repository*. Retrieved November 5, 2025, from <https://github.com/vlosing/driftDatasets>.
7. Gomes, H. M., Bifet, A., Read, J., Barddal, J. P., Enembreck, F., Pfahringer, B., Holmes, G., & Abdesslem, T. (2017). Adaptive random forests for evolving data stream classification. *Machine Learning*, 106, 1469–1495. <https://doi.org/10.1007/s10994-017-5642-8>.
8. Cano, A., & Krawczyk, B. (2020). Kappa updated ensemble for drifting data stream mining. *Machine Learning*, 109, 175–218. <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05840-z>.
9. Cano, A., & Krawczyk, B. (2022). ROSE: Robust online self-adjusting ensemble for continual learning on imbalanced drifting data streams. *Machine Learning*, 111, 2561–2599. <https://doi.org/10.1007/s10994-022-06168-x>.
10. Mahdi, O. A., Pardede, E., Ali, N., & Cao, J. (2020). Fast reaction to sudden concept drift in the absence of class labels. *Applied Sciences*, 10(2), 606. <https://doi.org/10.3390/app10020606>.
11. Adams, J. N., van Zelst, S. J., Rose, T., & van der Aalst, W. M. P. (2023). Explainable concept drift in process mining. *Information Systems*, 114, Article 102177. <https://doi.org/10.1016/j.is.2023.102177>.
12. Ghomeshi, H., Gaber, M. M., & Kovalchuk, Y. (2019). EACD: Evolutionary adaptation to concept drifts in data streams. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 33, 760–793. <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00614-6>.
13. Yu, E., Lu, J., Zhang, B., & Zhang, G. (2024). Online boosting adaptive learning under concept drift for multistream classification. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 38(15), 16522–16530. <https://doi.org/10.1609/aaai.v38i15.29590>.
14. Hu, L., Lu, Y., & Feng, Y. (2025). Concept drift detection based on deep neural networks and autoencoders. *Applied Sciences*, 15(6), Article 3056. <https://doi.org/10.3390/app15063056>.

Petro Vizhevskiy, Oleg Savenko, Prof., Dr. tech. sci
Khmenlnystskiy National University, Khmenlnystskiy, Ukraine

Evolutionary Adaptation of DLP Policies under Concept Drift in Streaming Data

In modern streaming DLP systems deployed across cloud and hybrid environments, fixed policies degrade rapidly due to concept drift. Operators must simultaneously control the risk-weighted miss cost, limit the false-alarm burden, meet latency SLOs, and keep alert streams stable under tight memory and compute budgets. These competing objectives are not adequately balanced by traditional detectors or manual policy tuning.

We present an online evolutionary controller that casts policy adaptation as constrained multi-objective optimization. The method uses a chromosome encoding with drift-aware exploration–exploitation switching, an archive of vetted policies for warm starts, a compact active mixture, and guarded rollbacks for operational safety. On six streams (synthetic and real), the controller keeps the integrated cost within 0–3.5% of the best baseline (mean absolute gap $\approx 1.6\%$), sustains p95 latency below 100 ms, and reduces alert-rate volatility by 50–63% while maintaining comparable or lower false-alarm rates.

Two practical sensitivities emerge: the drift-gate threshold governing the exploration/exploitation balance, and short-lived compute bursts immediately after detected changes. Warm starts, a compact mixture, and mutation-budget guards mitigate these effects without sacrificing responsiveness.

genetic algorithms, Data Loss Prevention, anomaly detection, concept drift, cloud security

Одержано (Received) 06.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

UDC 004.93'1:004.912:316.77

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.20-26](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.20-26)

Artem Kalancha¹, **Dmytro Uhryn**¹, Prof., DSc., **Oleksandr Dorenskyi**², Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Lytvyn**³, Assoc. Prof., DSc.

¹*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine,*

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

³*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

e-mail: d.ugryn@chmu.edu.ua, kalancha.artem@chmu.edu.ua, dorenskyiop@kntu.kr.ua, vasyly.v.lytvyn@lpnu.ua

Method of Integral Analysis of Relationships between Information Sources based on Temporal-Semantic Metrics

This study is devoted to the analysis of the relationships between information sources in the Ukrainian information space, in particular between news and political Telegram channels. The paper identifies the main shortcomings of existing analysis methods, which are mainly focused on the English-language context and do not take into account the dynamic nature of information sources. As an alternative to these methods, a new method of integral analysis is proposed, which combines several independent metrics at the same time - lexical similarity and temporal-semantic influence. The proposed and implemented approach allows us to assess not only the semantic similarity of sources, but also the nature of their interactions over time, forming a multidimensional matrix of relationships. The results obtained demonstrate the effectiveness of the integral approach for identifying hidden structures of information influence, which can be used for the further development of monitoring systems.

Artificial Intelligence, NLP, Information Flows, Information Sources, Integrated Analysis, Network Structures, Temporal Semantic Influence

Problem Statement. The modern Ukrainian information space is extremely rich, but at the same time fragmented into a large number of information sources. It contains hundreds, and sometimes thousands, of information sources, including anonymous Telegram channels, pages on social networks, and news aggregators, which often do not have clearly identified authors or editorial responsibility. There is an obvious need not only to compare the content of messages, but also to understand the relationships between the sources themselves: who influences whom, what topics become common, and how information signals spread over time.

Despite the growing interest in the analysis of information flows, most existing systems are focused on the foreign context. They mostly focus on large international media or English-language news agencies, leaving out of consideration the Ukrainian segment, which has its own fragmented dynamics, political specifics and social peculiarities. The methods underlying such systems are often one-dimensional, that is, they assess only textual similarity or activity of publications, ignoring temporal aspects, tonality and the complex structure of connections. Such assessments do not reflect the real complexity of interactions between sources.

Considering the above-described shortcomings, there is a need to create approaches that would be adapted to the Ukrainian information environment, taking into account the multidimensional nature of information influence.

Analysis of Recent Research and Publications. In the English-speaking information space, there are already developed systems that specialize in the analysis of information sources, but their effectiveness remains limited due to the specificity of the approaches and the context in which they were created. One example is Ad Fontes Media, a platform that evaluates American media in terms of political preferences and the level of reliability. Its main tool is the "Media Graph", which shows how much a certain publication gravitates towards the left or right of the political spectrum and how reliable the source itself is [1]. This approach forms a visual representation of the distribution of political positions in the American space.

Similarly, the AllSides project operates, which tries to ensure a comprehensive perception of information, allowing users to see news from different political perspectives [2]. Its value lies in demonstrating how the same event is interpreted by different media. Such systems are primarily focused on the American market, therefore they do not take into account the cultural and sociolinguistic features and structure of the Ukrainian information space.

Analyzing other scientific and technical developments aimed at automated analysis of sources, we also find mostly English-language methods that do not cover the dynamic nature of information influence. The MediaRank system offers a global ranking of thousands of news sites by reputation and semantic characteristics, which allows us to assess their quality and influence, but does not record how one source influences another in time [3]. The NELA ecosystem provides tools for comparing sources across content copying networks using vector representation models, but its analysis is limited to deterministic connections between publications [4]. The Semantic “Echo” method proposes to measure the “echo” of information messages through semantic similarity, calculating the similarity between official releases and publications in social networks, however, such a model does not take into account the temporal relationships between events [5]. One of the promising methods for further research is the approach based on Hawkes processes, which considers the spread of events as a self-exciting process, where each event temporarily increases the probability of the appearance of subsequent ones [6], but again, the impact assessment does not take into account the content similarity of messages, but only the fact of the appearance of the message itself.

These studies and systems cover a wide range of approaches to source assessment, but they all focus on unidimensional indicators and neglect multidimensional interaction between sources. For the Ukrainian information space, which is characterized by rapid changes in narratives and heterogeneity of sources, such a simplified logic of analysis is insufficient. The tasks related to the implementation and use of modern information technologies, particularly artificial intelligence, in the sphere of state information security are examined in scholarly work [12]. At the same time, studies [13, 14] present successful implementations of AI applications across various sectors.

Problem Definition. The aim of this study is to develop an approach that allows for an integrated analysis of information sources based on a combination of several independent source metrics (or their comparative metrics). Unlike traditional one-dimensional approaches, the proposed methodology involves the coordinated use of different types of similarity: semantic and temporal-semantic with the subsequent formation of a single resulting integral matrix. The desired approach allows not only to quantitatively assess the similarity between sources, but also to identify hidden links of influence that are formed over time.

This study is based on the idea of multidimensional comparison, in which each source is considered according to a single metric, but as part of a complex system of interactions. Within this system, it is important not only to compare the similarity of the text, but also to analyze the synchronicity of information waves, the patterns of occurrence of coincidences and the sequence of their distribution between sources. An integrated approach [7] creates the prerequisites for a more accurate reflection of the information space, identification of interconnected groups of sources, and construction of further models for assessing the impact within the Ukrainian information environment.

Main Results. This study used data obtained from eight information sources, in particular Telegram channels belonging to the news and political segment of the Ukrainian media space [8]. The collection period covers a six-month interval – from June 12, 2024 to December 12, 2024 inclusive. For each message, the basic message attributes are saved: channel identifier, message text and date of publication. This minimum required data format provides the possibility of further aggregation, thematic classification and temporal and semantic analysis. The channels were selected based on the principle of their activity,

audience reach and belonging to a common information space focused on news and political topics.

After determining the set of sources and data format, a stage of pre-processing of texts was carried out, which is of key importance for ensuring the reliability of further results. Taking into account the specifics of the content of Telegram channels, messages underwent several consecutive cleaning steps: removing special characters, numeric values, hyperlinks, formatting elements, as well as abbreviations and technical markers. Then, the texts were normalized by tokenization and removing stop words. Special attention was paid to language unification: all Russian-language messages were automatically translated into Ukrainian to preserve the semantic integrity of the corpus and avoid biasing the results when comparing lexical features. Detailed aspects of preprocessing text messages, adapted to the specifics of Telegram sources, are described in the author's previous study devoted to the methodology for normalizing and standardizing text data from open information streams [9].

The cosine similarity method is used to measure the similarity between lexical fields of information sources [10]. For each channel, a dictionary of words is formed with a count of the number of their occurrences in messages for the period under study. Words that occur less frequently than a set threshold (for example, less than 20 occurrences) are removed as statistically insignificant. Based on the dictionaries from all channels, a global dictionary is created that defines the feature space (words), where each channel is represented as a vector where the number of occurrences of a word forms its coordinates in the dimension.

To assess the similarity between channels, the cosine similarity formula is used, which defines the angle between two vectors in a multidimensional space:

$$cs(s_i, s_j) = \frac{z(s_i)^T z(s_j)}{\|z(s_i)\|_2 \|z(s_j)\|_2} \in [-1, 1],$$

where $z(s_{i,j})$ – source lexical vector.

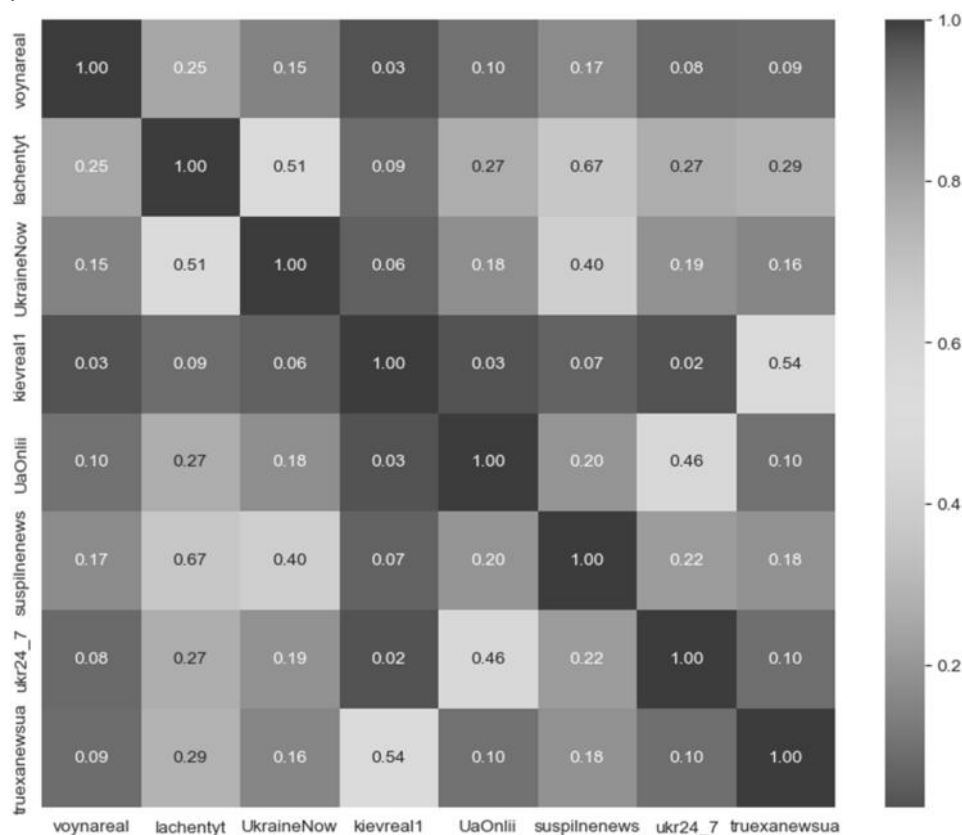


Figure 1 – Cosine similarity matrix between lexical fields of information sources

Source: visualized by the authors

This method is effective because it takes into account the proportions of vocabulary use, and not only its absolute frequencies, which allows you to correctly compare sources with different activity. Based on this, a similarity matrix is formed with values from 0 to 1, where larger values indicate greater proximity of lexical fields between channels.

Using input data and the cosine similarity method, similarity estimates between their lexical fields were calculated [11]. For each pair of sources, the similarity coefficient between the word frequency vectors was calculated and integrated into the similarity matrix (Fig. 1).

The Timed Semantic Influence (TSI) algorithm is designed to quantify the mutual influence between two information sources based on the temporal and semantic proximity of their messages. For each pair of channels A and B, messages from one channel are sequentially compared with messages from the other within a given time horizon, for example ± 8 hours. If there is a high semantic similarity between two messages (above a threshold s), such a pair is considered potentially related.

The key step of the algorithm is to calculate the TSI indicator, which takes into account both the degree of semantic similarity between the messages and the time difference between their publication. For this, the formula is used:

$$TSI = sm(m_a, m_b) * \exp(-\alpha \times (\Delta t/60)),$$

where the first factor reflects the semantic similarity between two messages, and the second – the exponential decrease in influence with increasing time distance between them, controlled by the coefficient α . After determining all relevant pairs of messages, the total indicator of influence between channels is calculated, which is recorded in the matrix of mutual influences.

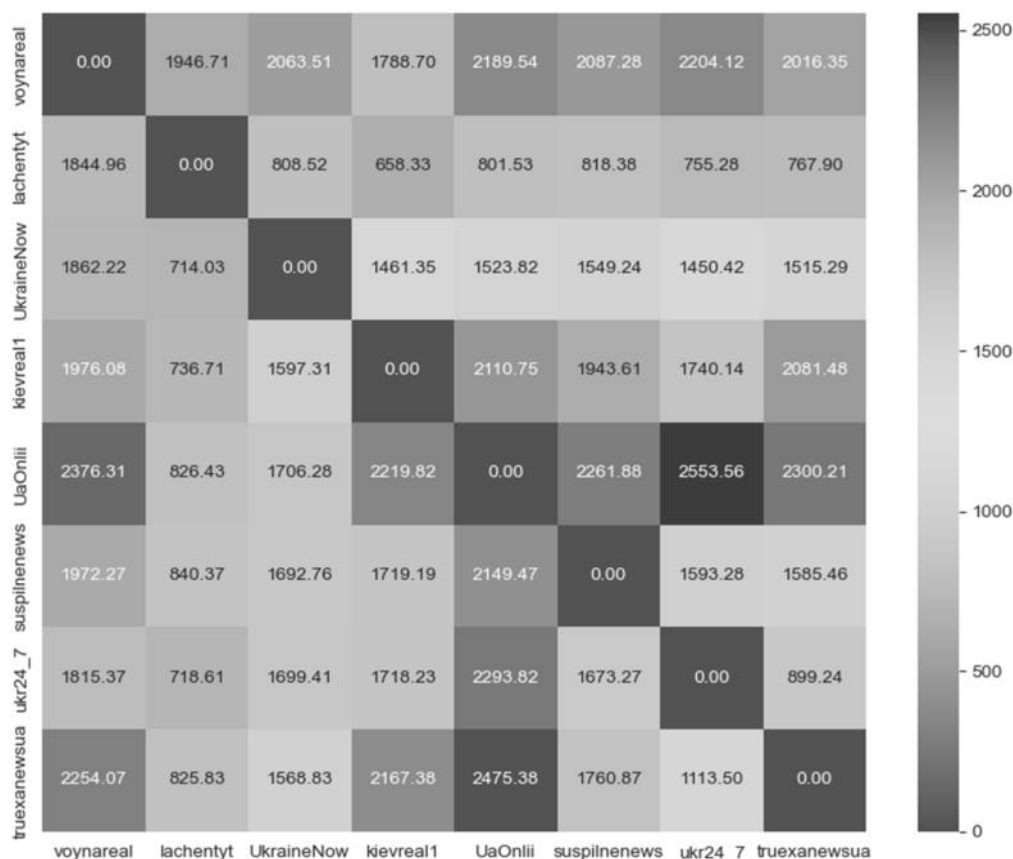


Figure 2 – Influence matrix between information sources based on TSI score

Source: visualized by the authors

Based on the prepared data, the TSI algorithm was applied to assess the mutual influence between channels. The TSI value was calculated for each pair of sources. As a result, a similarity matrix was formed (Fig. 2), where each element reflects the level of influence of one channel on another in absolute values.

Now, using the lexical similarity matrix and the mutual influence matrix between the channels, a resulting relationship matrix was constructed, which simultaneously takes into account the lexical and temporal characteristics of the sources and their messages. To ensure the correct combination, both matrices were reduced to a single scale. The influence matrix was normalized using the Min-Max normalization.

After normalization, the average value between the two corresponding metrics (matrices) was calculated for each pair of sources, forming an integral similarity matrix (Fig. 3). This approach allows you to simultaneously take into account both the similarity of the lexical field and the temporal-semantic influence between the sources, providing a more complete assessment of the relationships in the information space.

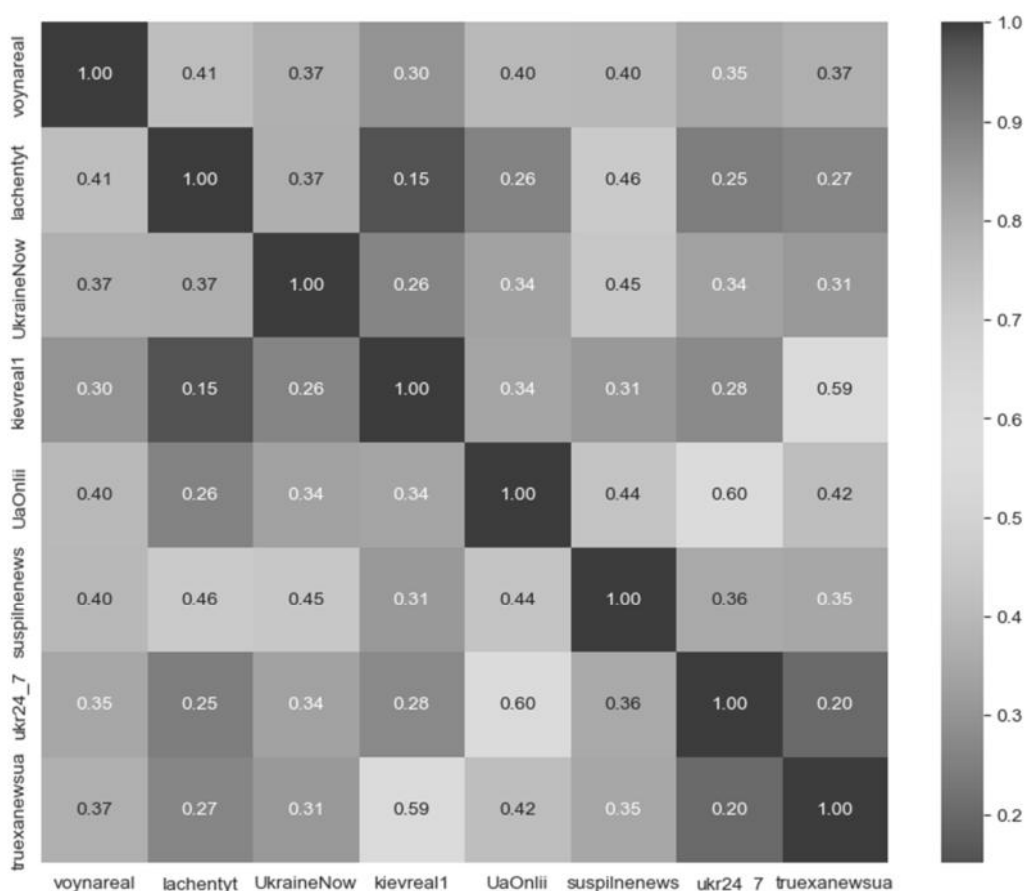


Figure 3 – Integral source comparison matrix

Source: visualized by the authors

Analysis of the obtained results showed that the greatest integral similarity is demonstrated by the pairs of channels truxanewsua – kievreal1, ukr24_7 – UaOnlii, suspilnenews – lachentyt and suspilnenews – UkraineNow. This indicates a close connection between their information flows. At the same time, it is observed that the leaders by the integral metric differ from those determined separately by cosine similarity or by TSI. It can be noted that cosine similarity takes into account the similarity of the general lexical field of

the source. While the TSI algorithm takes into account the similarity of two messages in a limited time space (8 hours).

Conclusions. This study demonstrated the problem of one-dimensional analysis of information sources, when only one type of similarity is assessed: temporal or, for the most part, only lexical. In response to this, an integral assessment method was proposed, which combines several metrics simultaneously. The proposed approach was implemented and tested on a limited set of Telegram channels, which allowed us to demonstrate its effectiveness and flexibility in real conditions.

The method showed that the combination of semantic and temporal characteristics allows us to more accurately identify the structure of relationships between sources. In particular, the pairs of channels *truexanewsua – kievreal1* and *urk24_7 – UaOnlii* achieved the highest connection indicators precisely during the integral analysis, although they had mediocre values in individual dimensions. This indicates the importance of a comprehensive approach that reflects the multidimensional nature of the information source.

In the further development of this direction, it is advisable to improve the method by introducing a weighted integral analysis, where each metric will have its own coefficient. This will allow you to regulate the influence of individual metrics on the final result and increase the accuracy of assessing the relationships between information sources.

List of References

1. Ad Fontes Media. Interactive Media Bias Chart. 2025. URL: <https://adfontesmedia.com/interactive-media-bias-chart/> (дата звернення: 02.09.2025).
2. AllSides. AllSides Media Bias Ratings. 2024. URL: <https://www.allsides.com/> (дата звернення: 03.09.2025).
3. Ye J., Skiena S. MediaRank: Computational ranking of online news sources. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1903.07581. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.07581>.
4. Horne B. D., Dron W., Khedr S., Adali S. Assessing the news landscape: A multi-module toolkit for evaluating the credibility of news. *Companion Proceedings of The Web Conference 2018 (WWW'18)*. 2018. P. 235–238. DOI: <https://doi.org/10.1145/3184558.3186987>.
5. Cann T. J. B., Dennes B., Coan T., O'Neill S., Williams H. T. P. Using semantic similarity and text embedding to measure the social media echo of strategic communications. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2303.16694. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.16694>.
6. Worrall J., Browning R., Wu P., Mengersen K. Fifty years later: New directions in Hawkes processes. *SORT*. 2022. Vol. 46, № 1. P. 3–38. DOI: <https://doi.org/10.2436/20.8080.02.116>.
7. Bazeley P. Integrating data analyses in mixed methods research. *Journal of Mixed Methods Research*. 2009. Vol. 3, № 3. P. 203–207. DOI: <https://doi.org/10.1177/1558689809334443>.
8. Telegram. Telegram APIs. 2025. URL: <https://core.telegram.org/> (дата звернення: 01.09.2025).
9. Kalancha A., Uhryn D. Optimizing text data storage for improved natural language processing: A comprehensive analysis. *Advances in Computer Science for Engineering and Education VII (ICCSEE 2024)*. Vol. 242. 2025. P. 294–303. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-84228-3_25.
10. Magara B. M., Ojo S. O., Zuva T. A comparative analysis of text similarity measures and algorithms in research paper recommender systems. *Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS)*. 2018. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTAS.2018.8368766>.
11. Uhryn D., Kalancha A., Zakharov M. Analysis of information sources based on the cosine similarity algorithm, affinity propagation and spectral clustering methods. *Proceedings of the Tenth International Congress on Information and Communication Technology (ICICT 2025)*. Vol. 1416. 2025. P. 239–249. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-6441-2_21.
12. Доренський О. П., Улічев О. С., Задорожний К. О., Коваленко А. С., Дресва Г. М. Концептуальна модель системи інформаційного протиборства 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).
13. 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: [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).
14. Шелехов І. В., Прилепа Д. В., Хібовська Ю. О., Шамонін К. Є., 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. С. 58–72. DOI: [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).

References

1. Ad Fontes Media. (2025). Interactive Media Bias Chart. URL: <https://adfontesmedia.com/interactive-media-bias-chart/> (accessed: 02.09.2025).
2. AllSides. (2024). AllSides Media Bias Ratings. URL: <https://www.allsides.com/> (accessed: 03.09.2025).
3. Ye, J., & Skiena, S. (2019). MediaRank: Computational ranking of online news sources. arXiv preprint, arXiv:1903.07581. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.07581>.
4. Horne, B. D., Dron, W., Khedr, S., & Adali, S. (2018). Assessing the news landscape: A multi-module toolkit for evaluating the credibility of news. *Companion Proceedings of The Web Conference 2018 (WWW'18)*, 235–238. <https://doi.org/10.1145/3184558.3186987>.
5. Cann, T. J. B., Dennes, B., Coan, T., O'Neill, S., & Williams, H. T. P. (2023). Using semantic similarity and text embedding to measure the social media echo of strategic communications. arXiv preprint, arXiv:2303.16694. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.16694>.
6. Worrall, J., Browning, R., Wu, P., & Mengersen, K. (2022). Fifty years later: New directions in Hawkes processes. *SORT*, 46(1), 3–38. <https://doi.org/10.2436/20.8080.02.116>.
7. Bazeley, P. (2009). Integrating data analyses in mixed methods research. *Journal of Mixed Methods Research*, 3(3), 203–207. <https://doi.org/10.1177/1558689809334443>.
8. Telegram. (2025). Telegram APIs. URL: <https://core.telegram.org/> (accessed: 01.09.2025).
9. Kalancha, A., & Uhryn, D. (2025). Optimizing text data storage for improved natural language processing: A comprehensive analysis. *Advances in Computer Science for Engineering and Education VII (ICCSEE 2024)*, 242, 294–303. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84228-3_25.
10. Magara, B. M., Ojo, S. O., & Zuva, T. (2018). A comparative analysis of text similarity measures and algorithms in research paper recommender systems. *Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICTAS.2018.8368766>.
11. Uhryn, D., Kalancha, A., & Zakharov, M. (2025). Analysis of information sources based on the cosine similarity algorithm, affinity propagation and spectral clustering methods. *Proceedings of the Tenth International Congress on Information and Communication Technology (ICICT 2025)*, 1416, 239–249. doi.org/10.1007/978-981-96-6441-2_21.
12. Dorenskyi, O. P., Ulichev, O. S., Zadorozhnyi, K. O., Kovalenko, A. S., & Drieieva, H. M. (2024). Conceptual model of information confrontation system of coordination center for national security and defense. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41) II, 23–31. [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) [in Ukrainian].
13. Kornienko, O., Kozub, N., & Dorenskyi, O. (2025). Method and technological solution of an AI-based adaptive investor survey service for risk profile identification. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42) 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).
14. Shelekhov, I. V., Prylepa, D. V., Khibovska, Yu. O., Shamonin, K. Ye., & Dorenskyi, O. P. (2025). Information-extreme technology of intelligent quality analysis of educational content in universities. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 12(43) I, 58–72. [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) [in Ukrainian].

А. Д. Каланча¹, **Д. І. Угрин**¹, проф., д-р техн. наук, **О. П. Доренський**², доц., канд. техн. наук,
В. В. Литвин³, проф., д-р техн. наук

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна,

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна,

³Національний університет "Львівська Політехніка", м. Львів, Україна

Метод інтегрального аналізу зв'язків між джерелами інформації на основі часово-семантичних метрик

Праця присвячена дослідженню взаємозв'язків між інформаційними джерелами в українському інформаційному просторі, зокрема між новинно-політичними каналами в Telegram. У роботі визначено основні недоліки наявних методів аналізу, що переважно орієнтовані на англomовний контекст і не враховують динамічну природу інформаційних джерел. Як альтернативу цим методам запропоновано новий метод інтегрального аналізу, який поєднує одночасно кілька незалежних метрик: лексичну подібність та часово-семантичний вплив. Запропонований та реалізований підхід дозволяє оцінювати не лише змістову схожість джерел, а й характер їхніх взаємодій у часі, формуючи багатовимірну матрицю зв'язків. Отримані результати демонструють ефективність інтегрального підходу для виявлення прихованих структур інформаційного впливу, що можуть бути використані для подальшого розвитку систем моніторингу.

штучний інтелект, NLP, інформаційні потоки, інформаційні джерела, інтегральний аналіз, мережеві структури, часово-семантичний вплив

Одержано (Received) 20.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 07.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

О. В. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **А. В. Пузікова**, доц., канд. фіз.-мат. наук,
Д. А. Оришечко

*Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,
м. Кропивницький, Україна*

e-mail: elena_drobot@ukr.net, a.v.puzikova@cuspu.edu.ua, 12026083@cuspu.edu.ua

Експериментальне дослідження ефективності моделі GPT-4o для оцінювання якості користувацьких інтерфейсів із врахуванням безпекових ризиків

У дослідженні вивчається ефективність мультимодальної моделі GPT-4o для використання її в ролі цифрового експерта з якості користувацького інтерфейсу з урахуванням безпекових ризиків шляхом проведення порівняльного аналізу оцінок, отриманих від GPT-4o та реальних експертів в єдиній системі критеріїв та UX-показників. Експеримент на вибірці з 20 сайтів ЗВО показав високий рівень відповідності між оцінками, отриманими від моделі GPT-4o та висновками фахівців, що підтверджено статистично значущими коефіцієнтами узгодженості оцінок. Виявлено, що модель GPT-4o здатна виявляти UX-вразливості, зокрема у сфері доступності, які можуть залишатися поза увагою експертів, що підтверджується аналітичними звітами. Отримані результати підтверджують доцільність використання мультимодальних моделей ШІ як засобів підсилення експертного аналізу та зменшення ресурсних витрат у процесах аудиту інтерфейсів.

аналіз вимог інтерфейсів, якість користувацьких інтерфейсів, GPT-4o, експертні оцінки, безпекові ризики

Постановка проблеми. Питання контролю якості користувацького інтерфейсу (User interface, UI) охоплюють широкий спектр заходів, що у сукупності забезпечують ефективну роботу вебпродукту, комфортну і безпечну взаємодію користувача із додатком та підвищення його конкурентоспроможності. Водночас аудит UI – процес тривалий і ресурсозатратний, і для малих команд він створює надмірне функціональне навантаження, потребуючи додаткових часу, зусиль та ресурсів. Зокрема, найбільш затратними по часу і по ресурсам є оцінювання якості інтерфейсу з точки зору користувацького досвіду (User Experience, UX) потенційних користувачів. Тому спостерігається зростання уваги до інтеграції інструментів штучного інтелекту (ШІ) у процеси контролю якості інтерфейсів з метою їх автоматизації, як у наукових колах дослідників, так і професійних колах практиків. [1, 2].

Сучасні інструменти автоматизації аудиту якості інтерфейсів з використанням ШІ в основному направлені на перевірку технічної продуктивності та тестування функціональності вебпродуктів [3, 4], але вони не можуть охопити когнітивні та емоційні аспекти користувацького досвіду, особливо при оцінюванні того, як користувачі сприймають та взаємодіють з інтерфейсами на психологічному рівні [5] і які вразливості інтерфейсу можуть обумовити потенційні безпекові ризики. Поява та бурхливий розвиток великих мовних моделей (LMM) з просунутими можливостями розуміння зображень, таких як мультимодальна модель GPT-4o, являють собою потенційну можливість організації автоматизованого оцінювання якості користувацького інтерфейсу з погляду зручності, доступності та інших важливих параметрів UX, які забезпечують комфортну та безпечну взаємодію користувача із продуктом. Але при цьому важливе розуміння, наскільки ефективно модель GPT-4o може функціонувати в якості експерта-оцінювача, уловлюючи аспекти взаємодії та безпекові ризики інтерфейсу з позицій користувацького досвіду. Зазначені вище обставини

зумовили інтерес до дослідження в цій галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки дослідниками активно ведеться наукова розвідка інтеграції інструментів LMM в процеси оцінювання якості користувацького інтерфейсу [5, 6] та безпекових ризиків [7-9].

Дослідження щодо застосування інструментів ШІ для аналізу якості інтерфейсів підтверджують ефективність таких підходів для проведення ретельного оцінювання UX/UI. Інструменти ШІ здатні генерувати змістовні аналітичні висновки щодо якості інтерфейсу, послідовно виявляти проблемні елементи дизайну та давати рекомендації для їх усунення на рівні з традиційними методами оцінювання [5, 6, 10]. Поява мультимодальних моделей з потужними навичками візуального сприйняття та розуміння, таких як GPT-4o відкриває нові можливості для автоматизації процесів оцінювання якості інтерфейсів вебпродуктів. Дослідження [11] присвячено питанням застосування моделі GPT-4o для оцінювання зручності інтерфейсів вебпродуктів на основі евристик Нільсена. Авторами проводилось дослідження продуктивності GPT-4o шляхом порівняння результатів евристичної оцінки інтерфейсів, отриманої від експертів, з результатами отриманих за допомогою GPT-4o, яке виявило, що GPT-4o виявляє проблеми зручності та присвоює їм оцінки серйозності, аналогічні експертним, але при цьому йому не вистачає глибини та гнучкості. У публікації [12] аналізувались можливості використання LMM для отримання синтетичних евристичних оцінок якості користувацького інтерфейсу мобільних додатків. Порівняльний аналіз синтетичних евристичних оцінок з еталонним набором оцінок, отриманих від людей показав здатність LMM оцінювати компоненти користувацького інтерфейсу і підтвердив її потенціал для генерації якісних даних, аналогічних оберненому зв'язку від користувача.

Оскільки процес розробки UX-дизайну тісно пов'язаний із впровадженням заходів безпеки з урахуванням потреб, можливостей та поведінки користувачів, в останні роки питання балансу між безпекою та зручністю використання ІТ-продукту обговорюється як в науково-дослідних роботах, так і серед професіоналів-практиків. Так, у статті [7] розглядається аспект доступності (accessibility) в безпеці, а саме: як спрощені/альтернативні інтерфейси можуть ослабити заходи безпеки; описуються складні виклики, з якими стикаються розробники під час покращення доступності та інклюзивності рішень у сфері кібербезпеки; надаються рекомендації з дизайну інклюзивних механізмів тощо. Дослідженню візуальних аспектів кібербезпеки, тобто впливу естетичної інформації на сприйняття й довіру користувачів до програмного продукту, присвячена робота [8]. UX-дизайнери також мають враховувати ризики фішингових атак під час проєктування користувацьких інтерфейсів. У статті [9] наведено практичні рекомендації для розробників поштових клієнтів щодо запобігання таким атакам через відповідні рішення в UX-дизайні.

Огляд публікацій показує, що питання розробки та дослідження нових інструментів для інтегрування ШІ у процеси оцінювання якості інтерфейсів є вельми актуальними та перспективними. Це дозволить значно знизити фінансові та часові витрати на тестування та підвищити якість програмних продуктів. Разом з цим, досліджуючи ефективність імплементації ШІ в автоматизовану систему оцінювання якості користувацького інтерфейсу, слід враховувати можливі безпекові ризики UX-дизайнів. Аналіз наявних у відкритому доступі джерел свідчить про недостатність приділеної уваги напрямку інтеграції інструментів LLM у процеси оцінювання якості користувацького інтерфейсу із врахуванням безпекових ризиків.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідити ефективність мультимодальної моделі GPT-4o як інструмента автоматизованого оцінювання якості користувацьких інтерфейсів із урахуванням безпекових ризиків.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі задачі: 1) проаналізувати систему критеріїв оцінювання якості користувацьких інтерфейсів та визначити притаманні їй безпекові ризики, що можуть впливати на результати експертного аналізу; 2) розробити процедуру порівняння експертних оцінок і результатів GPT-4o в єдиному просторі критеріїв та шкал, придатному для подальшого статистичного опрацювання; 3) провести емпіричне дослідження на вибірці 20 сайтів ЗВО, зібравши оцінки експертів-людей та результати моделі GPT-4o відповідно до розробленої процедури; 4) виконати статистичний аналіз узгодженості оцінок, зокрема обчислення коефіцієнтів узгодженості між оцінками експертів та GPT-4o; 5) порівняти аналітичні звіти про виявлені безпекові ризики, отримані від експертів та GPT-4o.

Виклад основного дослідження. Для перевірки якості інтерфейсу з позиції користувацького досвіду (UX-оцінювання) зазвичай застосовуються евристики Нільсена: видимість статусу системи, зв'язок між системою та реальним світом, контроль і свобода користувача, узгодженість і стандарти, запобігання помилкам, розпізнавання замість запам'ятовування, гнучкість та ефективність, естетика та мінімалізм візуального дизайну, допомога у виявленні та виправленні помилок, а також довідка та документація. У деяких дослідженнях вказується на використання інтегрованих евристик Нільсена та/або базових критеріїв взаємодії користувача з інтерфейсом [5, 11]. В нашому дослідженні експертне оцінювання якості UX інтерфейсу відбувалось за чотирма критеріями (Таблиця 1). Наведені критерії охоплюють базові аспекти взаємодії з користувачем, такі як інтуїтивно зрозуміле та зручне сприйняття екрану, чіткість та доступність інтерфейсу, візуальний дизайн та структурованість контенту.

Таблиця 1 - Критерії оцінювання якості UX інтерфейсів

№	Критерій	Що оцінюється	Показники
1	зручність	Наскільки інтерфейс зручний для користувача та не викликає зайвих труднощів	Логічність навігації, зрозумілість елементів, відсутність помилок, швидкість освоєння
2	доступність	Чи може сторінку використовувати якомога ширше коло людей, включно з користувачами з обмеженими можливостями	Контрастність тексту, масштабованість, наявність альтернативного тексту для зображень
3	Візуальний дизайн	Естетика та візуальна привабливість інтерфейсу	Узгодженість кольорів і шрифтів, візуальна ієрархія, баланс елементів, приємність сприйняття
4	Інформаційна архітектура	Як упорядкована та структурована інформація на сторінці	Логічна структура меню, зрозуміле групування контенту, швидкий доступ до потрібних даних, мінімізація перевантаження інформацією

Джерело: розроблено авторами

З описаними вище критеріями оцінювання якості UX інтерфейсів пов'язані безпекові ризики для користувача.

Впровадження складних функцій безпеки збільшує ймовірність того, що користувачі припустять помилку або повністю відмовляться від захисту. Виходячи з принципу психологічної прийнятності, інтерфейси функцій безпеки повинні бути зручними і простими у використанні, щоб уникнути помилок користувача в їхніх застосунках. З іншого боку, помічено, що якщо емоційна реакція користувачів на візуальний дизайн є позитивною, це робить їх більш толерантними до незначних проблем із зручністю використання [9]. Таким чином забезпечення естетичності і зручності використання підвищує довіру користувача до вебпродукту і може сприяти зниженню безпекових ризиків з боку користувача. Критерій зручності використання

вебдодатку пов'язаний з таким ризиками, як втрата даних (причиною може стати непередбачуване або незручне розташування кнопок), помилкові дії користувача (наприклад, введення конфіденційних даних у неправильні поля і відправка форми), випадкове виконання критичних дій (причиною може стати схожий стиль інструментів для безпечних та ризикових дій) тощо.

Такий критерій оцінювання якості UX інтерфейсів як доступність слід розглядати як важливий вимір у сфері проєктування заходів безпеки, орієнтованих на людину [14]. Згідно з даними WebAIM (Web Accessibility in Mind), на лютий 2025 року близько 95% найпопулярніших вебсайтів світу недоступні для людей з обмеженими можливостями [15]. Рекомендації щодо підвищення доступності веб-контенту наведені у Керівних принципах доступності вебконтенту (WCAG) 2.1 [16].

Помилкові дії користувача можуть бути наслідком як неправильно виконаного візуального дизайну так і нелогічно спроектованої інформаційної архітектури. Недостатньо опрацьований візуальний дизайн інтерфейсу може підвищувати ризик фішингових атак. Цьому сприяють: відсутність в інтерфейсі впізнаваних візуальних елементів (логотипу, фірмової палітри, уніфікованого стилю), що спрощує створення зловмисниками підроблених сторінок, некоректна ієрархія кольорів робить критично важливі повідомлення малопомітними, недостатньо помітні попереджувальні елементи тощо. Таким чином, під час оцінювання якості користувацького інтерфейсу необхідно також перевіряти, чи враховано у дизайні безпекові ризики.

Автоматизація оцінювання якості користувацького інтерфейсу здійснювалась за допомогою мобільного додатку, розробленого на базі Flutter [17]. Цей застосунок реалізує відправку скріншотів інтерфейсів користувача для їх оцінки з використанням нейромережі, а також відображує отримані від моделі GPT-4o результати; проводить оцінювання інтерфейсу за заданими критеріями із врахуванням безпечових ризиків в бальній шкалі та формує текстовий аналітичний звіт про якість інтерфейсу і рекомендації щодо його покращення.

Для аналізу ефективності інтеграції GPT-4o в процеси оцінювання якості UX інтерфейсу з урахуванням безпекових ризиків, було проведено експеримент по порівнянню оцінок якості вебінтерфейсу 20 сайтів ЗВО, отриманих від GPT-4o, з аналогічними оцінками, отриманими від експертів. В якості експертів-оцінювачів було залучено п'ять фахівців-тестувальників з досвідом роботи від 3 до 6 років. Оцінки за кожним із запропонованих критеріїв (Таблиця 1) пропонувалось давати в загальноприйнятій п'ятибальній шкалі: 1 – низька якість, 2 – нижче середньої, 3 – середня якість, 4 – вище середнього, 5 – висока якість. Також експерти надавали короткі аналітичні звіти про якість інтерфейсу по кожному сайту, окремо по кожному критерію, та рекомендації щодо її покращення у випадку низької оцінки хоча би за одним з критеріїв із врахуванням безпекових ризиків.

Експеримент проходив у два етапи. На першому етапі порівнювались бальні оцінки якості інтерфейсів, отримані від моделі GPT-4o та в результаті проведення колективної експертизи.

Після збору відповідей експертів, числові дані були систематизовані і представлені матрицями вигляду:

$$A^k = \|a_{i,j}^k\|, \quad k=\overline{1,4}, \quad i=\overline{1,20}, \quad j=\overline{1,5}, \quad (1)$$

де $a_{i,j}^k$ оцінка i -го об'єкта (відповідного сайту ЗВО) j -м експертом за k -м критерієм.

Обробка даних колективної експертизи передбачала розрахунок усередненої оцінки об'єктів по кожному із критеріїв, в результаті чого критеріальні матриці (1) звелись до критеріальних векторів вигляду:

$$a^{(k)} = (\overline{a_i^k}), \quad \overline{a_i^k} = \sum_{j=1}^{22} a_{ij}^k / 5, \quad (2)$$

де $\overline{a_i^k}$ середньозважена оцінка і-го об'єкта за k-м критерієм. Такі оцінки виражають, як правило, узгоджену думку групи, учасники якої мають однакову кваліфікацію.

Результати оцінювання якості UX інтерфейсу сайтів ЗВО, отримані від моделі GPT-4o та в результаті проведення колективної експертизи представлено у Таблиці 2.

Таблиця 2 - Оцінювання якості користувацьких інтерфейсів сайтів ЗВО

№	Назва ЗВО (скорочена), URL сайту	Критерій 1		Критерій 2		Критерій 3		Критерій 4	
		GPT-4o	Експерт	GPT-4o	Експерт	GPT-4o	Експерт	GPT-4o	Експерт
1	КНУ ім. Т.Шевченка www.knu.ua	3	4	2	4	2	4	3	4
2	Львівська політехніка lpnu.ua	4	4	3	4	4	4	4	5
3	МАУП www.maur.com.ua	3	2	2	2	3	2	3	3
4	КПІ ім. І.Сікорського kpi.ua	3	5	2	4	3	5	3	5
5	Запорізьська політехніка zp.edu.ua	3	3	2	2	3	3	3	3
6	XAI khai.edu.ua	4	4	3	4	4	4	3	5
7	ЧДТУ chdtu.edu.ua	3	2	2	3	2	2	3	3
8	УжНУ www.uzhnu.edu.ua	4	4	3	3	3	3	4	4
9	Житомирська політехніка ztu.edu.ua	4	4	3	3	5	4	4	4
10	ДНУ ім. О.Гончара www.dnu.dp.ua	3	4	2	4	2	3	3	4
11	ДУІТ duikt.edu.ua	4	4	3	4	3	4	4	4
12	ЦНТУ kntu.kr.ua	3	4	2	3	3	3	3	3
13	Одеська політехніка op.edu.ua	3	4	2	3	3	4	3	4
14	ЦДУ ім. В.Виниченка www.cusu.edu.ua	4	4	3	4	4	4	4	4
15	ЧНУ ім. Хмельницького www.cdu.edu.ua	3	2	3	4	2	2	3	3
16	ЗУНУ www.wunu.edu.ua	3	2	2	3	4	3	3	3
17	Вінницька політехніка vntu.edu.ua	3	3	2	3	3	4	3	3
18	ТНТУ ім. І.Пулюя tntu.edu.ua	3	2	3	4	2	3	3	4
19	ЧНУ ім. Ю.Федьковича www.chnu.edu.ua	4	4	3	3	5	4	4	3
20	ЛНТУ lntu.edu.ua/uk	3	4	4	4	4	5	3	3

Джерело: розроблено за результатами проведеного експертного дослідження

Для аналізу ефективності використання моделі GPT-4o в якості цифрового експерта у процесах оцінювання якості UX інтерфейсу було проведено дослідження рівня узгодженості оцінок, отриманих від GPT-4o та колективного експерта (збиральний образ оцінювача-людини) з використанням методів статистичного аналізу [18]. Для оцінки рівня узгодженості думок експертів доцільним є обчислення коефіцієнта парної рангової кореляції між бальними оцінками двох експертів (α , β) та інформаційної міри збігу експертних думок. Для розрахунку коефіцієнта парної рангової кореляції використовувалась формула:

$$\rho_{\alpha,\beta} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i^2}{(n^3 - n)/6 + (T_1 + T_2)/12}, \quad n=20, \quad (3)$$

де φ_i - різниця (за модулем) величин рангів оцінок і-го об'єкта, заданих експертами α , β , $\varphi_i = |R_{i,\alpha} - R_{i,\beta}|$; T_1, T_2 - показники однакових рангів оцінок експертів.

Інформаційна міра збігу думок (Устюжанінова) обчислювалась за формулою:

$$I_{\alpha,\beta} = 1 - \frac{2n_{\alpha,\beta}}{n_{\alpha} \times \log_2(1 + n_{\beta}/n_{\alpha}) + n_{\beta} \times \log_2(1 + n_{\alpha}/n_{\beta})}, \quad (4)$$

де $n_{\alpha,\beta}$ – кількість об'єктів однаково оцінених експертами α, β ; n_{α}, n_{β} – кількість об'єктів, оцінених відповідно експертом α та експертом β .

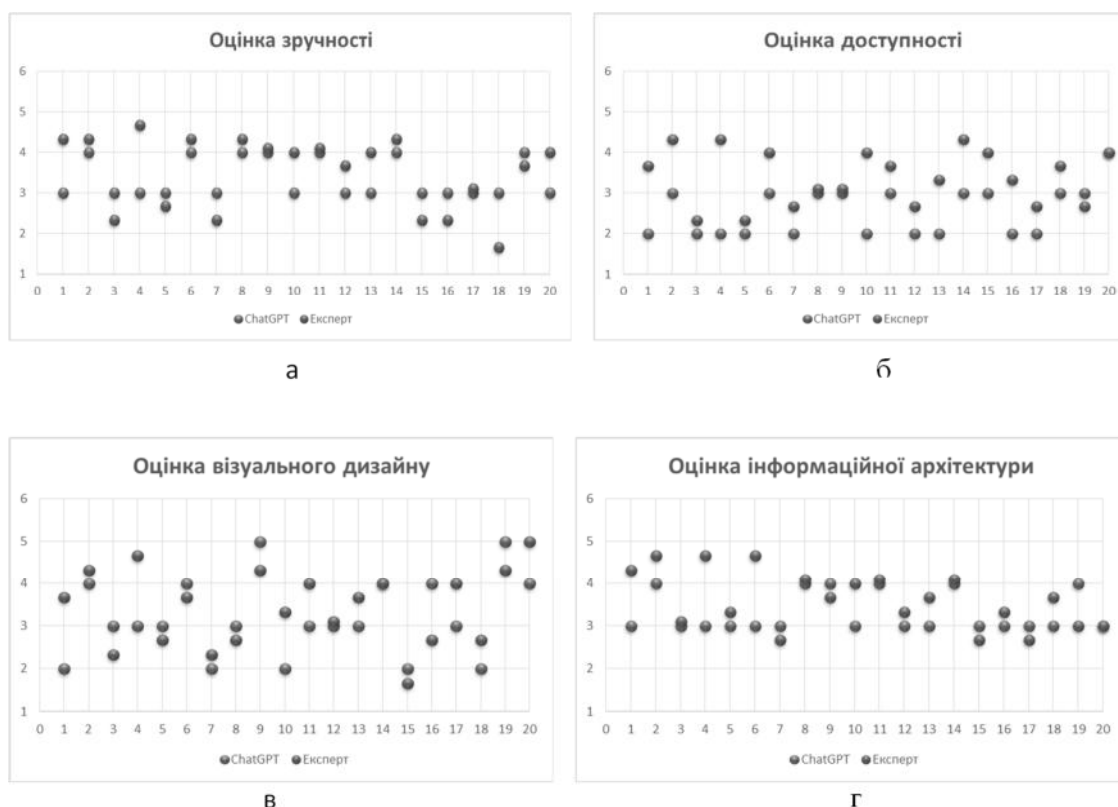
Коефіцієнти парної рангової кореляції та інформаційної міри збігу думок GPT-4o та експертів-людей обчислювались в Excel для кожного критерію окремо, результати обчислень представлено у Таблиці 3.

Таблиця 3. Результати визначення узгодженості думок експертів

Показник	Критерій 1	Критерій 2	Критерій 3	Критерій 4
$\rho_{\alpha,\beta}$	0,91	0,82	0,86	0,95
$I_{\alpha,\beta}$	0,81	0,67	0,72	1,2

Джерело: розроблено авторами за результатами проведених обчислень

Коефіцієнт попарної рангової кореляції змінюється в межах від -1 до +1. Думки експертів вважаються узгодженими, якщо коефіцієнт парної рангової кореляції перевищує 0,7. У випадках, коли $\rho \geq 0,9$, думки експертів вважаються сильно узгодженими. З таблиці 3 видно, що найкраще узгоджуються оцінки, отримані від GPT-4o з оцінками від експертів за критерієм 1 («зручність») і критерієм 4 («інформаційна архітектура»). На порядок нижче узгоджені оцінки GPT-4o та експертів за критерієм 3 («візуальний дизайн») і найменша міра узгодженості спостерігається за критерієм 2 («доступність»). На рис. 2 представлена візуалізація співставлення оцінок, отриманих від GPT-4o та від експертів-оцінювачів.



а – критерій 1 («зручність»); б - критерій 2 («доступність»); в - критерій 3 (візуальний дизайн); г - критерій 4 («інформаційна архітектура»)

Рисунок 2 – Порівняльні діаграми оцінок, отриманих від GPT-4o та експертів-оцінювачів за критеріями 1-4

Джерело: розроблено авторами

Суттєва розбіжність оцінок, наданих GPT-4o та експертами-оцінювачами за критерієм 2 (рис.2 б) на нашу думку обумовлюється тим, що, як розробники так і тестувальники мають значний досвід розробки та оцінювання програмного забезпечення, але при цьому – обмежений досвід, пов'язаний із забезпеченням доступності системи, яка фактично має бути інклюзивною. Складність для розробників враховувати вимоги доступності, а тестувальникам – враховувати широкий спектр вразливостей для людей з особливими потребами також підтверджується дослідженням [13].

На другому етапі експерименту порівнювались аналітичні звіти про якість інтерфейсів, зроблені GPT-4o та експертами-оцінювачами. Аналіз відбувався за напрямками: виявлення та опис проблем в рамках одного і того ж критерію; фіксація безпекових ризиків; рекомендації по покращенню якості інтерфейсу.

Суттєвих відмінностей у показниках виявлення проблем якості користувацького інтерфейсу за критеріями 1, 3 та 4 не виявлено (рис.2 а, в, г). Але, при порівнянні аналітичних звітів про якість інтерфейсу за критерієм 2 («доступність») виявилось, що модель GPT-4o дозволяє враховувати ширший спектр вразливостей ніж той, що надається експертами. Зважаючи на більш строге оцінювання критерію 2, надане GPT-4o (що підтверджується рекомендаціями в аналітичних звітах) з метою забезпечення розробниками та тестувальниками відповідності вимогам до доступності продуктів та послуг ІКТ згідно з європейським стандартом EN 301 549 [19], вважаємо доцільним залучення інструментів на базі ШІ до оцінювання критерію доступності.

Слід також зазначити, що другий етап експерименту в нашому дослідженні грав роль допоміжного заходу для перевірки обґрунтованості отриманих бальних оцінок якості користувацького інтерфейсу (чи використовувались при цьому подібні міркування у експертів та GPT-4o) і інтерпретація отриманих результатів аналітичних звітів потребує окремого дослідження.

Висновки. У роботі представлено результати експерименту, спрямовано на вивчення ефективності GPT-4o, як інструмента для оцінювання якості користувацького інтерфейсу з урахуванням безпекових ризиків.

Основні результати дослідження:

1. Встановлено перелік критичних безпекових ризиків, притаманних обраній системі критеріїв оцінювання користувацьких інтерфейсів, а також визначено їх вплив на якість та об'єктивність UX-аналізу.

2. Розроблено двоетапну процедуру проведення експериментального дослідження.

3. Доведено статистично значущу узгодженість між оцінками GPT-4o та експертів-людей, що свідчить про можливість використання моделі як надійного суб'єкта оцінювання в процесах UX-аудиту.

4. Виявлено, що модель GPT-4o здатна виявляти UX-вразливості, зокрема щодо доступності та інклюзивності, які залишаються поза увагою експертів, що є важливим для оцінювання вебресурсів, орієнтованих на користувачів з особливими потребами.

Дане дослідження вносить певний вклад в сегмент задач автоматизації оцінювання UX-інтерфейсу, використовуючи сучасні інструменти ШІ, базові UX-показники якості інтерфейсу та пов'язані із ними безпекові ризики. Отримані результати обґрунтовують доцільність інтеграції сучасних мультимодальних моделей ШІ у процеси аудиту інтерфейсів як інструментів підсилення експертного аналізу, здатних зменшувати трудомісткість та ресурсні витрати при оцінюванні UX-інтерфейсу IT-систем.

Перспективи подальших досліджень включають розширення експериментальної частини із залученням експертів, як із кола тестувальників, так і фахівців із кібербезпеки, а також збільшення кількості критеріїв для оцінки якості інтерфейсу. Крім того, не зважаючи на популярність GPT-4o, в майбутніх дослідженнях можуть бути розглянуті інші LLM, які можуть відрізнятись по згенерованим результатам та необхідним ресурсам.

Список літератури

1. Takaffoli M., Li S., Mäkelä V. Generative AI in User Experience Design and Research: How Do UX Practitioners, Teams, and Companies Use GenAI in Industry? *Designing Interactive Systems Conference: Proc. of the ACM Int. Conf.*, 1-5 July 2024. Copenhagen, Denmark 2024. P. 1579–1593. DOI: 10.1145/3643834.3660720.
2. Muratovic F., Kearns-Manolatos D., Alibage A. Generative AI in Software Development: Challenges, Opportunities, and New Paradigms for Quality Assurance. *Computer*. 2025. Vol. 58, № 7. P. 31-39. DOI: 10.1109/MC.2025.3556330.
3. Wang J., Huang Y., Chen C., Liu Z., Wang S., Wang Q. Software Testing With Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2023. Vol. 50. P. 911-936. DOI: 10.1109/TSE.2024.3368208.
4. Ворочек О.Г., Соловей І.В. Дослідження засобів штучного інтелекту для автоматизації процесу тестування програмного забезпечення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. 2024. № 1 (11) 2024. С. 58-64. DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.09.
5. Hsueh N.-L., Lin H.-J., Lai L.-C. Applying Large Language Model to User Experience Testing. *Electronics*. 2024. T.13, № 23. DOI: 10.3390/electronics13234633.
6. Freeman L., Robert J., Wojton H. The Impact of Generative AI on Test & Evaluation: Challenges and Opportunities. *Foundations of Software Engineering: Proc. of the 33rd ACM Int. Conf.* 23-28 June 2025. Norway. P. 1376-1380. DOI: 10.1145/3696630.3728723.
7. Quinlan M., Ceross A., Simpson A. The aesthetics of cyber security: How dousers perceive them? *arXiv preprint*. arXiv: 2306.08171v1. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.08171.
8. Petelka J., Zou Ye., Schaub F. Put Your Warning Where Your Link Is: Improving and Evaluating Email Phishing Warnings. *Human Factors in Computing Systems (CHI): Proc. Conf.* 4-9 May 2019. Glasgow Scotland Uk. No. 518. P.1-15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300748>.
9. Moran K. The Aesthetic-Usability Effect. *Nielsen Norman Group: UX-Training, Consulting, & Research*: вебсайт URL: <https://www.nngroup.com/articles/aesthetic-usability-effect/> (дата звернення: 26.10.2025).
10. Duan P., Chen C.-Y., Li G., Hartmann B., Li Ya. Generating Automatic Feedback on UI Mockups with Large Language Models. *Human Factors in Computing Systems: Proc. of the CHI Int. Conf.* 11-16 May 2024. NU,United States. P.1-20. DOI: 10.1145/3613904.3642782.
11. Guerino G., Rodrigues L., Capeleti B., Mello R.F., Freire A., Zaina L. Can GPT-4o Evaluate Usability Like Human Experts? A Comparative Study on Issue Identification in Heuristic Evaluation. *arXiv preprint*. arXiv: 2506.16345v1. 2025 (дата звернення: 26.10.2025).
12. Zhong R., Hsieh G., McDonald D. How can LLMs support UX Practitioners with image-related tasks? *GenAI/CHI: Workshop on Generative AI and HCI*. 2024. P.1-6. URL: https://generativeaiandhci.github.io/papers/2024/genaichi2024_29.pdf (дата звернення: 26.10.2025).
13. Renaud K., Coles-Kemp L. Accessible and Inclusive Cyber Security: A Nuanced and Complex Challenge. *SN Computer Science*. 2022. Vol.3. DOI: 10.1007/s42979-022-01239-1.
14. Renaud K. Accessible cyber security: the next frontier? *Information Systems Security and Privacy: Proc. of the 7th Int. Conf.* 11-13 February 2021. P. 9–18. DOI: 10.5220/0010419500090018.
15. Web Accessibility in Mind: вебсайт URL: <https://webaim.org/projects/million/> (дата звернення: 26.10.2025).
16. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. W3C Recommendation 06 May 2025: вебсайт URL: https://www.w3.org/TR/WCAG21/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 11.10.2025).
17. Flutter documentation: вебсайт URL: <https://flutter.dev/docs> (дата звернення: 20.10.2025).
18. Гнатієнко Г.М., Снитюк В.Є. Експертні технології прийняття рішень: Монографія. Київ: ТОВ «Маклаут», 2008, 444 с. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56847> (дата звернення: 28.09.2025).
19. Accessibility requirements for ICT products and services. *Harmonised European Standart*: вебсайт URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301549/03.02.01_60/en_301549v030201p.pdf.

References

1. Takaffoli, M., Li, S., & Mäkelä, V. (2024). *Generative AI in User Experience Design and Research: How Do UX Practitioners, Teams, and Companies Use GenAI in Industry?* *Designing Interactive Systems Conference: Proceedings of the ACM International Conference* (pp. 1579–1593), July 1–5, 2024, Copenhagen, Denmark. <https://doi.org/10.1145/3643834.3660720>.
2. Muratovic, F., Kearns-Manolatos, D., & Alibage, A. (2025). *Generative AI in Software Development: Challenges, Opportunities, and New Paradigms for Quality Assurance*. *Computer*, 58(7), 31–39. doi.org/10.1109/MC.2025.3556330.
3. Wang, J., Huang, Y., Chen, C., Liu, Z., Wang, S., & Wang, Q. (2023). *Software Testing With Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision*. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 50, 911–936. <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208>.
4. Vorochek, O. H., & Solovei, I. V. (2024). *Doslidzhennia zasobiv shtuchnoho intelektu dlia avtomatyzatsii protsesu testuvannia prohramnoho zabezpechennia* [Research of artificial intelligence tools for automating software testing processes]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii*, 1(11) 2024, 58–64. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2024.01.09> [in Ukrainian].
5. Hsueh, N.-L., Lin, H.-J., & Lai, L.-C. (2024). *Applying Large Language Model to User Experience Testing*. *Electronics*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/electronics13234633>.

6. Freeman, L., Robert, J., & Wojton, H. (2025). *The Impact of Generative AI on Test & Evaluation: Challenges and Opportunities*. Foundations of Software Engineering: Proceedings of the 33rd ACM International Conference (pp. 1376–1380), June 23–28, 2025, Norway. <https://doi.org/10.1145/3696630.3728723>.
7. Quinlan, M., Ceross, A., & Simpson, A. (2023). *The aesthetics of cyber security: How do users perceive them?* arXiv preprint, arXiv:2306.08171v1. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.08171>.
8. Petelka, J., Zou, Y., & Schaub, F. (2019). *Put Your Warning Where Your Link Is: Improving and Evaluating Email Phishing Warnings*. Human Factors in Computing Systems (CHI): Proceedings of the Conference, May 4–9, 2019, Glasgow, Scotland, UK (No. 518, pp. 1–15). <https://doi.org/10.1145/3290605.3300748>.
9. Moran, K. (2025, October 26). *The Aesthetic-Usability Effect*. Nielsen Norman Group: UX-Training, Consulting, & Research. <https://www.nngroup.com/articles/aesthetic-usability-effect/>.
10. Duan, P., Chen, C.-Y., Li, G., Hartmann, B., & Li, Y. (2024). *Generating Automatic Feedback on UI Mockups with Large Language Models*. Human Factors in Computing Systems: Proceedings of the CHI International Conference, May 11–16, 2024, NU, United States (pp. 1–20). <https://doi.org/10.1145/3613904.3642782>.
11. Guerino, G., Rodrigues, L., Capeleti, B., Mello, R. F., Freire, A., & Zaina, L. (2025). *Can GPT-4o Evaluate Usability Like Human Experts? A Comparative Study on Issue Identification in Heuristic Evaluation*. arXiv preprint, arXiv:2506.16345v1.
12. Zhong, R., Hsieh, G., & McDonald, D. (2024). *How can LLMs support UX Practitioners with image-related tasks?* GenAICHI: Workshop on Generative AI and HCI (pp. 1–6). generativeaiandhci.github.io/papers/2024/genaichi2024_29.pdf.
13. Renaud, K., & Coles-Kemp, L. (2022). *Accessible and Inclusive Cyber Security: A Nuanced and Complex Challenge*. SN Computer Science, 3. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01239-1>.
14. Renaud, K. (2021). *Accessible cyber security: the next frontier?* Information Systems Security and Privacy: Proceedings of the 7th International Conference, February 11–13, 2021 (pp. 9–18). doi.org/10.5220/0010419500090018.
15. Web Accessibility in Mind. (2025, October 26). *WebAIM: Web Accessibility Evaluation Report*. <https://webaim.org/projects/million/>.
16. World Wide Web Consortium. (2025, May 6). *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. https://www.w3.org/TR/WCAG21/?utm_source=chatgpt.com.
17. Flutter. (2025, October 20). *Flutter Documentation*. <https://flutter.dev/docs>.
18. Hnatiienko, H. M., & Snytiuk, V. Ye. (2008). *Ekspertni tekhnolohii pryiniattia rishen: Monohrafiia* [Expert decision-making technologies: Monograph]. Kyiv: TOV «Maklaut», 444 p. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56847> [in Ukrainian].
19. European Telecommunications Standards Institute. (n.d.). *Accessibility requirements for ICT products and services*. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301549/03.02.01_60/en_301549v030201p.pdf.

Olena Prysiazniuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Puzikova**, Assoc. Prof., PhD phi-math. sci., **Dmytro Oryshechko**
Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Experimental Study of the Effectiveness of the GPT-4o Model for Evaluating the Quality of User Interfaces with Consideration of Security Risks

The emergence of multimodal large language models (LLMs), including GPT-4o, creates new opportunities for automating the evaluation of user interface quality in terms of usability, accessibility, and security. A review of publicly available sources demonstrates that the integration of LLM-based tools for user interface evaluation, particularly in the context of security risk assessment, remains insufficiently explored. The purpose of this article is to examine the effectiveness of employing the multimodal GPT-4o model for automating the assessment of web interface quality from a user experience perspective, with consideration of security risks.

The research involved the development and implementation of a set of methodological procedures, which included: 1) defining a system of evaluation criteria (usability, accessibility, visual design, and information architecture) and analyzing the associated security risks; 2) conducting a series of expert assessments of the interfaces of 20 university websites, performed by human experts and by GPT-4o using a unified set of criteria and scoring scales. In addition to numerical assessments, the experts prepared analytical reports documenting security risks identified in cases where an interface received a low score for at least one criterion, together with recommendations for improvement; 3) performing a comparative analysis of the obtained results using agreement coefficients to evaluate the consistency between GPT-4o and human evaluators.

The effectiveness of GPT-4o integration was assessed based on the degree of alignment between model-generated and human-generated scores, as well as the structure and quality of the analytical reports produced by GPT-4o. Main results of the study: 1) a set of critical security risks inherent to the selected system of user interface evaluation criteria has been identified, and their impact on the quality and objectivity of UX analysis has been determined; 2) a two-stage procedure for conducting the experimental study has been developed; 3) statistically significant agreement between the evaluations provided by GPT-4o and human experts has been demonstrated, indicating the feasibility of employing the model as a reliable assessment agent within UX audit processes; 4) it has been established that GPT-4o is capable of detecting a broader spectrum of UX vulnerabilities – particularly those related to accessibility and inclusivity – than human experts, which is essential for evaluating web resources intended for users with special needs.

interface requirements analysis, user interface quality, artificial intelligence, GPT-4o, expert evaluations, security risks

Одержано (Received) 29.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 13.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

УДК 004.415.53:621.791

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.36-54](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.36-54)

Т. В. Смірнова¹, канд. техн. наук, **К. О. Буравченко**¹, доц., канд. техн. наук,
О. А. Добринчук², мол. наук. співр., **С. А. Смірнов**¹, доц., канд. техн. наук,
Н. М. Якименко¹, доц., канд. фіз.-мат. наук, **О. А. Смірнов**¹, проф., д-р техн. наук

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

²Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна

e-mail: sm.tetyana@gmail.com, buravchenkok@gmail.com, dobrynychuk85@icloud.com,
smirnov.ser.81@gmail.com, kntukafpz@gmail.com, dr.smirnovoa@gmail.com

Хмарна технологія моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічних процесів у критичній інфраструктурі

В роботі розроблена хмарна технологія для моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічних процесів критичної інфраструктури у реальному часі з метою виявлення відхилень у технологічних процесах, а також для попередження атак (збоїв) шляхом аналізу аномальної поведінки обладнання, зміни режимів навантаження, споживання ресурсів тощо. Отримала подальший розвиток короткочасна модель ключових індикаторів ефективності, яка дозволяє систематизувати параметри моніторингу в інформаційно-комунікаційних системах об'єктів критичної інфраструктури, формалізувати автоматичну обробку даних, підтримати інтеграцію з аналітичними хмарними платформами, а також визначити відхилення (аномалії), кіберінциденти, деградацію, надмірне навантаження або саботаж і, як наслідок, підготувати агрегованих ключових індикаторів ефективності для щоденного моніторингу операторами та ІТ-службами. Запропоновано модель технологічного процесу електродугової обробки в інженерії БПЛА, яка в умовах сучасного етапу російсько-української війни є частиною критичної інфраструктури у секторі економіки та оборонно-промислового виробництва. Це пов'язано з тим, що БПЛА відіграють зараз вирішальну роль на полі бою. Розроблено схему моніторингу ключових індикаторів ефективності для технологічного процесу електродугової обробки. Для цього запропоновано використання хмарних технологій, наведено загальну схему технологічного процесу електродугової обробки в інженерії БПЛА, з їх використанням. Реалізовано приклад інфраструктури моделі на основі хмарної платформи Azure. Модель даних представлена у форматі JSON (який є ефективним для API, MQTT-брокера або Kafka). Перевірка моделі на емпіричних даних підтвердила її відповідність вимогам, стійкість до зміни умов та велику значимість для моніторингу технологічних процесів у критичній інфраструктурі. В умовах цифровізації та протидії кіберризикам модель є основою для створення цифрового двійника виробничої системи. Таким чином забезпечується надійність, прогнозованість і безпека. У роботі запропонована інтеграція з алгоритмами штучного інтелекту/машинного навчання (AI/ML), такими як LSTM, що дозволяє у режимі реального часу розширену аналітику, адаптивне управління процесом та автоматизоване прийняття рішень. У перспективі зазначений алгоритм LSTM можна використати для побудови моделі прогнозування параметрів ключових індикаторів ефективності у системі електродугової обробки, також можна використати інші алгоритми AI/ML та інтелектуального аналізу даних, які здатні обробляти великі обсяги часових рядів та враховувати складні нелінійні залежності між технологічними параметрами.

хмарна технологія, технологічні процеси, критична інфраструктура, інформаційно-комунікаційна система, електродугова обробка, БПЛА, кіберризик, кібербезпека, інтернет речей, штучний інтелект, машинне навчання

Постановка проблеми. У сучасних умовах цифрової трансформації державного управління, промисловості та енергетики, критична інфраструктура (КІ) держави стає дедалі більш залежною від інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та їх сервісів [1]. Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП), промислові IoT-рішення та цифрові платформи забезпечують безперервність, продуктивність і точність виробничих та інфраструктурних операцій. Проте зростання складності цих систем вимагає переходу від традиційного моніторингу до інтелектуального аналізу ключових індикаторів ефективності (KPI, Key Performance

Indicators), що відображають як технічний, так і економічний стан функціонування об'єктів КІ. Стрімке переведення інформації у цифрову форму приводить до зростання кількості та складності кіберзагроз, спрямованих саме на об'єкти КІ [2], до яких відносяться об'єкти енергетичної структури, транспортної мережі, водопостачання, зв'язку, закладів охорони здоров'я.

Атаки типу ransomware, складні APT-кампанії, виведення з ладу SCADA-компонентів і вторгнення у хмарні сервіси демонструють, що стандартні методи контролю більше не є достатніми. Умови повномасштабної війни показали, що транспортні вузли, засоби телекомунікації, енергетичні системи, об'єкти охорони здоров'я України перебувають під постійною загрозою. Країна агресор постійно атакує об'єкти КІ поєднуючи з цілеспрямованими кібератаками на автоматизовані системи управління. Тиск з усіх боків вимагає не лише фізичного захисту об'єктів, а й оперативного цифрового відстежування функціонального стану обладнання, що дозволяє швидко реагувати на нестандартні або шкідливі дії різного характеру. Відповідно до цього, система відстежування ключових показників ефективності, яка впроваджується з застосуванням хмарних технологій та елементів реалізації кіберзахисту, повинна стати, навіть в умовах бойових дій або перебоїв зв'язку з окремими об'єктами, ключовим засобом підтримки стійкості й відновлення інфраструктури в реальному часі.

Мониторинг KPI дозволяє у реальному часі визначити відхилення у технологічних процесах. Крім того, цей моніторинг дозволяє попередити наслідки атак за рахунок аналізу нестандартної поведінки обладнання, аномальної зміни режимів навантаження та споживання ресурсів. Застосування хмарних технологій дозволяє реалізувати нові можливості відстежування показників ефективності (KPI) з віддаленим доступом і централізованим керування, що є більш масштабним, надійним та безпечним. Використання хмарних сервісів дозволяє об'єднання даних з географічно розподілених об'єктів, а застосування AI/ML дозволяє знаходити приховані загрози та передбачити збої обладнання під час реалізації технологічного процесу. Таким чином, використання хмарних технологій для відстежування KPI у сфері КІ, в умовах повномасштабного вторгнення, гібридної війни, ризиків техногенних катастроф та тероризму, є стратегічно значущим кроком у забезпеченні кіберстійкості держави, а не лише тільки потрібним технологічним рішенням [3].

Метою дослідження є виявлення відхилень у технологічних процесах, а також попередження атак (збоїв) шляхом аналізу аномальної поведінки обладнання, зміни режимів навантаження, споживання ресурсів тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз [4-7] показав, що індекси KPI вказують на параметри стану технологічних процесів, технічного обладнання, безпеки, економічної та організаційної продуктивності, які є критично важливими. Для спостереження за цими індексами необхідна висока швидкість обробки даних, забезпечення надійності та впровадження масштабованості. Врахування усього цього обґрунтовує використання хмарних платформ, як багатообіцяючої бази реалізації систем моніторингу індексів KPI.

Використання сучасних хмарних платформ, таких як AWS, Microsoft Azure, Google Cloud, IBM Cloud, надає можливість обробляти гетерогенні потоки даних з різних джерел даних, до яких можливо віднести IoT-сенсори, SCADA-системи, ERP/CRM-системи, логістичні модулі. Це дозволяє створювати потужні сервіси для побудови систем збору, обробки, зберігання та аналітики великих даних в режимі реального часу, у межах єдиної хмарної архітектури. Хмарна інфраструктура забезпечує гнучкий доступ до KPI, інструменти для їхньої візуалізації (через Grafana,

Power BI, Kibana), а також інтеграцію з модулями AI/ML, які дають змогу прогнозувати аномалії та ризики ще до настання критичних подій.

Останні наукові дослідження демонструють переваги хмарних рішень у критичних галузях, зокрема в енергетиці, транспорті, оборонній промисловості [4]. Доведено, що використання хмарних обчислень для KPI-аналітики підвищує швидкість реагування на відхилення в системах управління [5]. Перехід на PaaS-рішення з вбудованими KPI-модулями дозволяє значно знизити витрати на IT-інфраструктуру, про що засвідчують інші дослідження. Особливо перспективними вважаються хмарні сервіси з підтримкою Edge Computing, які дозволяють обробляти дані максимально близько до джерел (датчиків, контролерів) і синхронізувати їх із центральними дашбордами в хмарі [6, 7].

Водночас існують і виклики: ризики втрати конфіденційності даних, залежність від постачальників хмарних послуг (vendor lock-in), необхідність відповідності нормативам безпеки (GDPR, ISO/IEC 27017, NIST 800-53). У відповідь на це активно розвиваються моделі гібридних та приватних хмар, що дозволяють реалізувати критично важливі системи моніторингу в умовах підвищених вимог до безпеки й контролю над даними [8-10].

Таким чином можливо зробити висновок, що застосування хмарних технологій для моніторингу індексів ключових індикаторів ефективності (KPI) являє собою перспективний науковий та практичний напрям. Такий підхід поєднує аналітику великих даних, моделі прогнозування, оперативну візуалізацію та централізоване управління у єдиному середовищі.

Постановка завдання. У даному дослідженні необхідно розробити хмарну технологію для моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічних процесів критичної інфраструктури у реальному часі з метою виявлення відхилень у технологічних процесах, а також попередження атак (збоїв) шляхом аналізу аномальної поведінки обладнання, зміни режимів навантаження, споживання ресурсів тощо.

Виклад основного матеріалу. *Кортежна модель моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічних процесів у критичній інфраструктурі*

Для розроблення узагальненої формалізованої кортежної моделі ключових індикаторів ефективності технологічних процесів у КІ, використовуючи теорію множин [11-13], необхідно визначити найбільш важливі індикатори ефективності (множини), виконавши наступні кроки:

Крок 1. Визначимо множину об'єктів моніторингу:

$$O = \{\cup_{i=1}^n O_i\} = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}, \quad (1)$$

де $O_i \subseteq O$ ($i = \overline{1, n}$) – об'єкти моніторингу (сервер, насос, трансформатор, лінія зв'язку, SCADA-модуль, технологічна лінія тощо), з яких система братиме певні параметри для подальшого аналізу.

Крок 2. Визначимо множину параметрів процесу:

$$P = \{\cup_{i=1}^k P_i\} = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}, \quad (2)$$

де $P_i \subseteq P$ ($i = \overline{1, k}$) – один з контрольованих системою параметрів (фізичних, логічних, кіберпараметрів тощо), що вимірюється певним пристроєм за допомогою певного методу вимірювання (наприклад, температура, тиск, затримка, навантаження, напруга живлення тощо).

Крок 3. Визначимо множину методів вимірювання:

$$M = P \rightarrow \mathcal{F}, \quad (3)$$

де $\mathcal{F} = \{\text{сенсори, логфайли, метрики з API, агентські дані}\}$, що є фактичним відображенням параметрів P_i у методи збору даних.

Крок 4. Визначимо множини iнтервалiв спостереження:

$$T = \{\cup_{i=1}^m T_i\} = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}, \quad (4)$$

де $T_i \in \mathbb{R}$ – конкретний часовий iнтервал або дискрет, протягом якого здiйснюється вимiрювання $\mathcal{F}$ певних параметрiв процесу P_i .

Крок 5. Визначимо множини допустимих або нормативних значень KPI:

$$D = \{\cup_{i=1}^k D_i\} = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}, \quad (5)$$

де $D_i = [\min P_i; \max P_i]$ – допустимi або нормативнi значення параметрiв P_i KPI.

Крок 6. Визначимо множини значень KPI у певний момент часу:

$$V = \{\cup_{i=1}^k V_i\} = \{V_1, V_2, \dots, V_k\}, \quad (6)$$

де $V_i = \{v_{i,t} \in \mathbb{R} | P_i \subseteq P, t \in T\}$ – реальнi вимiряння значення параметрiв P_i KPI в момент часу t .

Крок 7. Визначимо множини правил обробки та агрегацiї даних (KPI):

$$R = \{f_1, f_2, \dots, f_l\}, \quad (7)$$

де $f_i \subseteq f$ ($i = \overline{1, l}$), $f_i: V \rightarrow \mathbb{R}$ – функцiонали, що описують правила аналізу KPI (для прикладу, усереднення, максимум / мiнимум, похiдна, тренд тощо).

Крок 8. Визначимо множини способiв семантичної iнтерпретацiї отриманих станiв KPI:

$$A = \{\cup_{i=1}^p A_i\} = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}, \quad (8)$$

де $A_i \subseteq A$ ($i = \overline{1, p}$) – способ семантичної iнтерпретацiї стану KPI (наприклад, «нормальний», «аномальний», «загроза», «критичний стан», «помилка», «аварiя», «кризова ситуацiя» тощо).

Вiдповiдно, функцiю виявлення аномалiї можна представити наступним чином:

$$\delta: V \times D \rightarrow A. \quad (9)$$

З урахуванням (1) – (8) формалiзована кортежна модель KPI технологiчних процесiв у КІ можна представити у виглядi кортежу параметрiв:

$$KPI = \{\cup_{i=1}^q KPI_i\} = \{KPI_1, KPI_2, \dots, KPI_q\}, \quad (10)$$

де $KPI_i \subseteq KPI$ ($i = \overline{1, q}$) – ключовi iндикатори ефективностi технологiчних процесiв у КІ.

Отримана кортежна модель KPI (10) дозволяє систематизувати параметри монiторингу в ІКС об'єктiв КІ, формалiзувати автоматичну обробку даних, пiдтримати iнтеграцiю з аналітичними хмарними платформами (Prometheus, Azure Monitor, Grafana, etc.), а також визначити вiдхилення (аномалiї), кiберiнциденти, деградацiю, надмiрне навантаження або саботаж i, як наслiдок, пiдготувати агрегованi KPI для щоденного монiторингу операторами та IT-службами.

На рисунку 1 представлено схематичне вiдображення моделi, яка є узагальненим вiдображенням процесу монiторингу ключових показникiв ефективностi будь-яких технологiчних процесiв, що реалiзуються в секторах КІ держави [14-15].

У наступному пiдпунктi даної роботи буде розглянуто приклад реалiзацiї зазначеної моделi для технологiчного процесу електродугової обробки (ЕДО) [16-18] в iнженерiї БПЛА.

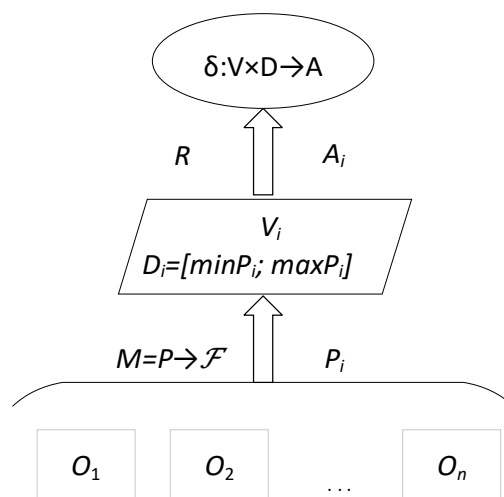


Рисунок 1 – Схематичне відображення моделі моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічних процесів

Джерело: розроблено авторами

Приклад практичної реалізації коротежної моделі моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА

ЕДО є одним із ключових технологічних процесів в авіаційній інженерії, який забезпечує високоточне виготовлення, модифікацію або відновлення критичних деталей літальних апаратів. Завдяки використанню дугового розряду, що виникає між електродом і оброблюваною поверхнею, досягається локалізоване плавлення матеріалу з мінімальним тепловим впливом на прилеглі зони. Це особливо важливо при роботі з високолегкованими, тугоплавкими або термочутливими сплавами, які широко застосовуються в авіаційних конструкціях – зокрема, в елементах двигунів, шасі, паливних системах, та каркасних компонентах літаків і БПЛА.

У виробництві та ремонті авіаційної техніки ЕДО використовується як для формування нових деталей методом наплавлення або дугового різання, так і для відновлення зношених поверхонь. Наприклад, нанесення зносостійкого шару на крайку лопатки компресора турбореактивного двигуна дозволяє значно подовжити її експлуатаційний ресурс без необхідності повної заміни. Крім того, електродугова наплавка використовується для ремонту тріщин, пор або зношених отворів у корпусних елементах, де точність і надійність шва мають критичне значення. Завдяки можливості точного контролю струму, напруги, швидкості подачі електрода і траєкторії наплавлення, ЕДО забезпечує необхідні механічні властивості з'єднання – міцність, герметичність, ударостійкість – без ризику структурної деформації або перегріву.

Ще одним важливим аспектом застосування ЕДО в авіації є можливість її інтеграції з автоматизованими та роботизованими системами, що підвищує відтворюваність, продуктивність та безпеку процесу. При великосерійному виробництві та обробці деталей складної геометрії, а саме таким є виробництво БПЛА, що набрало надзвичайну актуальність на сучасному етапі повномасштабного вторгнення, людський фактор може стати причиною помилки або помилок, тому ця інтеграція є надзвичайно необхідною. Застосування новітніх наукових розробок дозволяє об'єднувати системи ЕДО з сучасними технологіями машинного зору, цифрового моніторингу KPI та контролю якості у режимі реального часу. Це робить їх у рамках авіаційної промисловості невід'ємним складником концепції «розумного виробництва» (Smart Manufacturing) [19-20]. Тому, можемо зробити висновок щодо ЕДО, як провідної технології, що дозволяє в умовах жорстких нормативних вимог до

авіаційної техніки, забезпечити високу надійність та точність виробництва, яка потрібна при виробництві БПЛА.

У сфері БПЛА технологія ЕДО набуває дедалі більшого значення як ефективна технологія для виготовлення, ремонту та модернізації компонентів, що зазнають значних механічних і термічних навантажень. Зокрема, ЕДО активно використовується для наплавлення зносостійких або антикорозійних шарів на деталі, що входять до складу силової установки, елементів шасі або вузлів кріплення крил. В умовах, коли БПЛА часто експлуатуються в агресивному середовищі – пил, волога, температурні коливання, – такі технології дозволяють не тільки підвищити ресурс техніки, а й адаптувати її до специфічних умов бойового чи цивільного застосування.

Особливої актуальності ЕДО набуває при виробництві тактичних БПЛА, які мають невеликі розміри, але потребують високої точності виготовлення та структурної міцності. При такому виробництві ЕДО використовується для формування несучих елементів каркасу, кріплень гвинтових агрегатів, деталей систем посадки. Це реалізується даним технологічним процесом завдячуючи локальній дії та можливості роботи з композиційними матеріалами або сплавами на основі титану й алюмінію. Також технологія активно впроваджується для створення захисних екранів і демпферів у БПЛА, що несуть на борту електроніку, оптичні прилади чи корисне навантаження – дозволяючи формувати складні конструкції із вбудованим захистом за однопрохідний або багатопрохідний цикл обробки.

Крім виготовлення, ЕДО демонструє високу ефективність у відновлювальних процесах для БПЛА, що особливо важливо в умовах воєнного часу. Наприклад, пошкоджені під час бойових вильотів корпусні деталі або монтажні вузли можуть бути відремонтовані методами дугового наплавлення чи зварювання без повного демонтажу чи заміни. Це значно скорочує час відновлення й дає змогу оперативно повертати дрони до експлуатації. У перспективі поєднання ЕДО з адитивними технологіями (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) [21] відкриває можливості для створення складних деталей БПЛА «з нуля» – без використання дорогих прес-форм або лиття, що критично важливо для розгортання польових ремонтно-виробничих модулів у зоні бойових дій. Таким чином, ЕДО виступає ключовим елементом інноваційного циклу життєвого забезпечення безпілотних систем.

Розглянемо частковий випадок реалізації моделі, розробленої вище для технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА, враховуючи (1) – (9):

Крок 1. Визначимо множину об'єктів моніторингу при виготовленні БПЛА:

При $n=3$ (тобто в технологічному процесі ЕДО при виготовленні БПЛА в цеху використовується паралельно 3 установки, що забезпечують технологічний процес) вираз (1) матиме вигляд:

$$O = \{\cup_{i=1}^3 O_i\} = \{O_1, O_2, O_3\} = \{EDO_1, EDO_2, EDO_3\},$$

де EDO_1, EDO_2, EDO_3 – це установки, що забезпечують технологічний процес ЕДО в цеху при виготовленні БПЛА.

Крок 2. Визначимо множину параметрів процесу ЕДО:

При $k=5$ (тобто в технологічному процесі ЕДО при виготовленні БПЛА в цеху важливими для моніторингу є 5 параметрів технологічного процесу) вираз (2) матиме вигляд:

$$P = \{\cup_{i=1}^5 P_i\} = \{P_1, P_2, \dots, P_5\} = \{U, I, T, v, f\}, \quad (12)$$

де $P_1 = U$ – напруга, $P_2 = I$ – струм, $P_3 = T$ – температура зони обробки, $P_4 = v$ – швидкість подачі електрода, $P_5 = f$ – частота коливань дуги.

Крок 3. Визначимо множину методів вимірювання параметрів процесу ЕДО:

При вимірюванні напруги, струму, температури зони обробки, швидкості подачі електрода та частоти коливань дуги вираз (3) з урахуванням (12) матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned}M_1 &= U, I \rightarrow \mathcal{F}_1, \\M_2 &= T \rightarrow \mathcal{F}_2, \\M_3 &= v \rightarrow \mathcal{F}_3, \\M_4 &= f \rightarrow \mathcal{F}_4,\end{aligned}$$

де $\mathcal{F}_1$ – цифрові осцилографи через OPC/Modbus для вимірювання напруги і струму, $\mathcal{F}_2$ – термопари типу К із передачею по MQTT для вимірювання температури зони обробки, $\mathcal{F}_3$ – енкодери рухомих вузлів для вимірювання швидкості подачі електрода, $\mathcal{F}_4$ – аналіз сигналу від плазмотрону (Fourier/FFT) → Edge AI для вимірювання частоти коливань дуги.

Передавання даних відбувається через IoT-шлюзи до хмари (Azure IoT Hub / AWS Greengrass → AWS IoT Core).

Крок 4. Визначимо множину інтервалів спостереження, протягом яких здійснюється вимірювання в процесі ЕДО:

При $m=3$ (обрано три базові інтервали спостереження) вираз (4) матиме наступний вигляд:

$$T = \{\cup_{i=1}^3 T_i\} = \{T_1, T_2, T_3\} = \{1, 5, 60\},$$

де $T_1 = 1$ с., $T_2 = 5$ с. та $T_3 = 60$ с. (агрегація) – це базові інтервали, протягом якого здійснюється вимірювання параметрів процесу ЕДО.

Крок 5. Визначимо множину допустимих або нормативних значень KPI процесу ЕДО:

При $k=5$ (як зазначалось, в технологічному процесі ЕДО при виготовленні БПЛА в цеху важливими для моніторингу є 5 параметрів технологічного процесу, відповідно кожен параметр має певні граничні значення) вираз (5) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}D &= \{\cup_{i=1}^5 D_i\} = \{D_1, D_2, \dots, D_5\} = \{[\min P_1; \max P_1], [\min P_2; \max P_2], \\&[\min P_3; \max P_3], [\min P_4; \max P_4], [\min P_5; \max P_5]\} = \{[80; 120], [100; 180], \\&[900; 1300], [0,2; 1,0], [1000; 1300]\},\end{aligned}$$

де $D_1 = [\min P_1; \max P_1] = [80; 120]$ – граничні значення напруги (у Вольтах, В), $D_2 = [\min P_2; \max P_2] = [100; 180]$ – граничні значення сили струму (в Амперах, А), $D_3 = [\min P_3; \max P_3] = [900; 1300]$ – граничні значення температури зони обробки (у градусах Цельсія, °C), $D_4 = [\min P_4; \max P_4] = [0,2; 1,0]$ – граничні значення швидкості подачі електрода (у сантиметрах на секунду, см/с), $D_5 = [\min P_5; \max P_5] = [1000; 1300]$ – граничні значення частоти коливань дуги (у Герцах, Гц).

Крок 6. Визначимо множину значень KPI, виміряних у певний момент часу в процесі ЕДО:

При $k=5$ (як зазначалось, в технологічному процесі ЕДО при виготовленні БПЛА в цеху важливими для моніторингу є 5 параметрів технологічного процесу) вираз (6) матиме вигляд:

$$V = \{\cup_{i=1}^5 V_i\} = \{V_1, V_2, \dots, V_5\} = \{100, 150, 1400, 1, 1100\},$$

де $V_1 = 100, V_2 = 150, V_3 = 1400, V_4 = 1, V_5 = 1100$ – реальні виміряні значення параметрів KPI (напруга, струм, температура зони обробки, швидкість подачі електрода та частота коливань дуги відповідно) в момент часу t .

Отримані дані передаються у хмарну СУБД (наприклад, AWS Timestream або Azure Data Explorer) або в InfluxDB для часових рядів та подальшого їх аналізу системою.

Крок 7. Визначимо множину правил обробки та агрегації даних, отриманих від системи моніторингу в процесі ЕДО:

При $l=5$ вираз (7) матиме наступний вигляд:

$R = \{f_1, f_2, \dots, f_l\} = \{f_1, f_2, \dots, f_5\} = \{f_{trend}(U), f_{mean}(I), f_{std}(T), f_{mean}(v), f_{FFT}(f)\}$, де $f_1 = f_{trend}(U)$ – лінійна регресія зміни напруги, $f_2 = f_{mean}(I)$ – середній струм за хвилину (наприклад 150 A), $f_3 = f_{std}(T)$ – відхилення температури (наприклад, 100°C), $f_4 = f_{mean}(v)$ – середня швидкість подачі електрода (для прикладу, 0,5 см/с), $f_5 = f_{FFT}(f)$ – гармонійний аналіз коливань дуги.

Обробка даних здійснюється через хмарні платформи AWS Lambda / Azure Functions або Spark Streaming.

Крок 8. Визначимо множину способів семантичної інтерпретації отриманих станів KPI системи моніторингу в процесі ЕДО:

При $p=9$ вираз (8) матиме наступний вигляд:

$$A = \{\cup_{i=1}^9 A_i\} = \{A_1, A_2, \dots, A_9\} = \{NORMAL, ANOMALY, THREAT, CRITICAL, ERROR, CRISIS, DISASTER, WARNING, DEVIATION\},$$

де $A_1 = NORMAL$, $A_2 = ANOMALY$, $A_3 = THREAT$, $A_4 = CRITICAL$, $A_5 = ERROR$, $A_6 = CRISIS$, $A_7 = DISASTER$, $A_8 = WARNING$, $A_9 = DEVIATION$ – визначені способи семантичної інтерпретації стану KPI на основі аналізу параметрів (аномалія, загроза, критично, помилка, криза, аварійний стан, увага, відхилення відповідно).

Функцію виявлення аномалії можна реалізувати, наприклад, через Threshold Alerts (Prometheus, Azure Monitor) чи AI-based detection (наприклад, anomaly detection в Azure Synapse ML або Amazon Lookout for Metrics). Тоді, враховуючи (9), вона матиме наступний вигляд:

$$\delta: V \times D \rightarrow A \in \{NORMAL, NORMAL, DEVIATION, NORMAL, NORMAL, \}$$

Враховуючи виконані кроки згідно (1) – (8) частковий випадок кортежної моделі (10) для технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА (при $q = 8$) матиме такий вигляд:

$$KPI_{EDO} = \{\cup_{i=1}^8 KPI_i\} = \{KPI_1, KPI_2, \dots, KPI_8\} = \{O, P, M, T, D, V, R, A\}. \quad (13)$$

Відповідно, схематично розроблену модель моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічних процесів, що розроблена в попередньому підрозділі і представлена на рисунку 1 для технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА можна представити наступним чином:

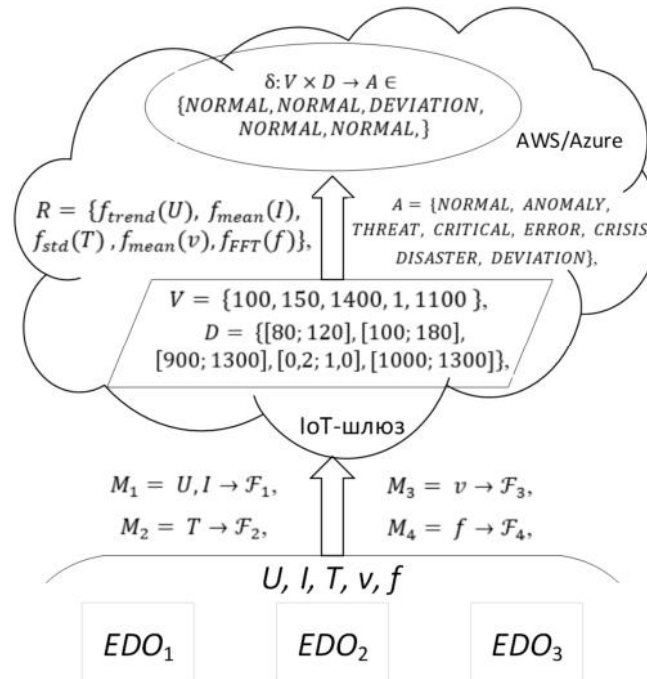


Рисунок 2 – Схематичне відображення моделі моніторингу ключових індикаторів ефективності для технологічного процесу ЕДО

Джерело: розроблено авторами

Приклад інфраструктури реалізації моделі в хмарі Azure (обраний сервіс не є обов'язковим для застосування, а використовується лише як наглядний приклад – може бути використано будь-який інший рівноцінний за функціоналом сервіс) наведено на рисунку 3:

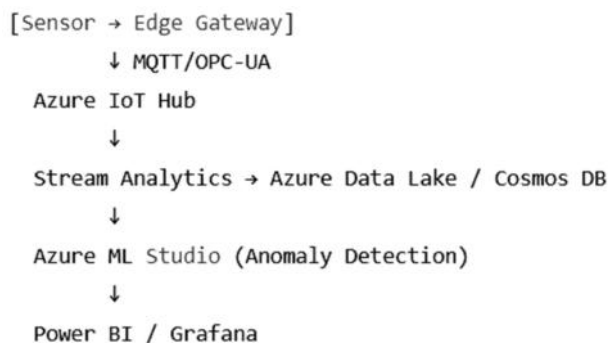


Рисунок 3 – Варіант інфраструктури реалізації моделі в хмарі

Джерело: розроблено авторами

Модель даних у форматі JSON, що є зручним представленням для API, MQTT-брокера або Kafka, відображено на рисунку 4:

```

{
  "KPI": {
    "object": "EDO_Station_01",
    "parameters": {
      "current": { "value": 175, "unit": "A", "status": "OK" },
      "temperature": { "value": 1200, "unit": "C", "status": "Warning" }
    },
    "timestamp": "2025-07-18T10:05:00Z"
  }
}

```

Рисунок 4 – JSON модель даних

Джерело: розроблено авторами

Схема технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА на основі хмарних технологій, для якого представлено частковий випадок кортежної моделі (13), відображена на рисунку 5:

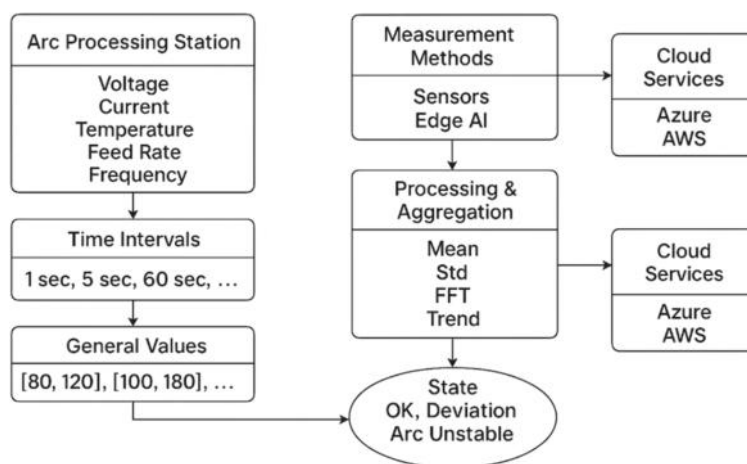


Рисунок 5 – Схема технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА на основі хмарних технологій

Джерело: розроблено авторами

Наступний підрозділ даної роботи присвячений верифікації розробленої моделі у контексті її придатності до практичної імплементації.

4. Верифікація моделі моніторингу ключових індикаторів ефективності технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА

Згідно [12] визначено множину параметрів $P = \{U, I, T, v, f\}$, яка є важливою для технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА. Одним із ключових параметрів є струм I . Верифікуємо модель на прикладі зазначеного параметру. Як зазначалось в п. 3 граничними значеннями сили струму, вимірюваної в амперах, є $[100; 180]$. Дослідимо вплив зміни параметру струму на КРІ на інтервалі спостереження $T_3 = 60$ с. На рис. 6 відображено яким чином значення I впливає на кінцеву функцію виявлення аномалії $\delta: V \times D \rightarrow A$.

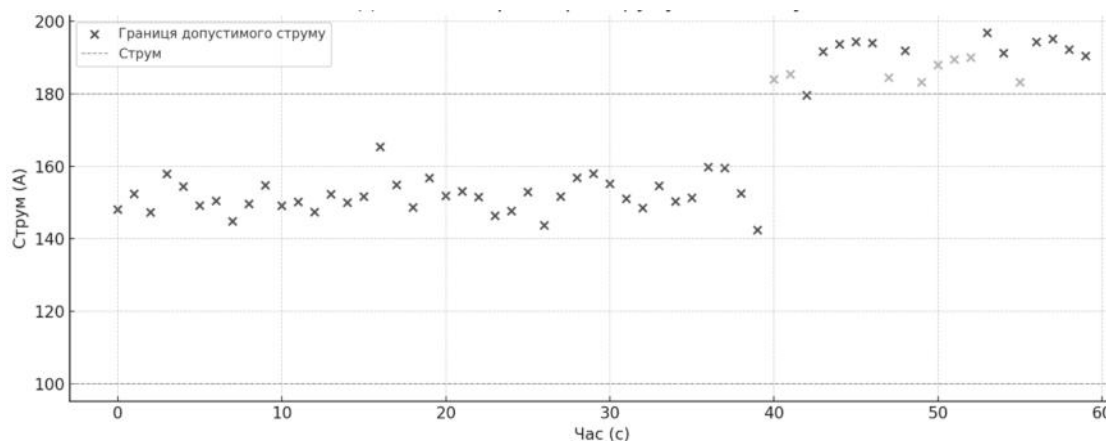


Рисунок 6 – Вплив відхилення сили струму I на статус КРІ

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 6 можна побачити, як струм змінюється протягом часу, а також визначено його КРІ-статус згідно (8) – (9) на основі встановлених у моделі обмежень (граничних значень). У другій частині симуляції моделюється відхилення (перевищення), що призводить до появи негативних статусів, що демонструє роботу кортежної моделі у динаміці (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати моделювання струму I протягом інтервалу T_3

Час, с	I , А	A (статус КРІ)
0	148.05	NORMAL
1	152.35	NORMAL
2	147.25	NORMAL
3	157.86	NORMAL
4	154.39	NORMAL
5	149.13	NORMAL
6	150.42	NORMAL
7	144.78	NORMAL
8	149.58	NORMAL
9	154.72	NORMAL
10	149.08	NORMAL
11	150.13	NORMAL
12	147.34	NORMAL
13	152.25	NORMAL
14	149.94	NORMAL
15	151.61	NORMAL

Продовження таблиці 1

16	165.32	NORMAL
17	154.84	NORMAL
18	148.61	NORMAL
19	156.74	NORMAL
20	151.8	NORMAL
21	1504	NORMAL
22	151.47	NORMAL
23	146.32	NORMAL
24	147.61	NORMAL
25	152.89	NORMAL
26	1467	NORMAL
27	151.62	NORMAL
28	156.79	NORMAL
29	157.91	NORMAL
30	155.14	NORMAL
31	151.01	NORMAL
32	148.45	NORMAL
33	154.57	NORMAL
34	150.26	NORMAL
35	151.27	NORMAL
36	159.73	NORMAL
37	159.48	NORMAL
39	152.47	NORMAL
40	142.37	NORMAL
41	1895	WARNING
42	185.37	WARNING
43	179.55	NORMAL
44	191.61	CRITICAL
45	1966	CRITICAL
46	194.33	CRITICAL
47	1998	CRITICAL
48	184.43	WARNING
49	191.85	CRITICAL
50	1817	WARNING
51	187.94	WARNING
52	189.44	WARNING
53	189.97	WARNING
54	196.82	CRITICAL
55	191.2	CRITICAL
56	1814	WARNING
57	194.28	CRITICAL
58	195.11	CRITICAL
59	192.18	CRITICAL

Джерело: розроблено авторами

З рис. 6 та таблиці 1 наглядно видно, що починаючи з 41-ї секунди значення струму I знижується і з'являються негативні статуси KPI, які передаються системою моніторингу до центру прийняття рішень.

Підвищення струму понад 180 А у системі ЕДО викликає ланцюгову реакцію ризиків – від деградації обладнання до зниження якості виробу, що є особливо небезпечним у контексті виготовлення відповідальних компонентів для авіації або

БПЛА. Саме тому в кортежній моделі КРІ перевищення струму призводить до статусу CRITICAL, що має ініціювати негайне реагування системи моніторингу.

Для порівняння розглянемо інші два важливі для технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА параметри з кортежу $P = \{U, I, T, v, f\}$ – це напруга U (рисунок 7) та температура T (рисунок 8).

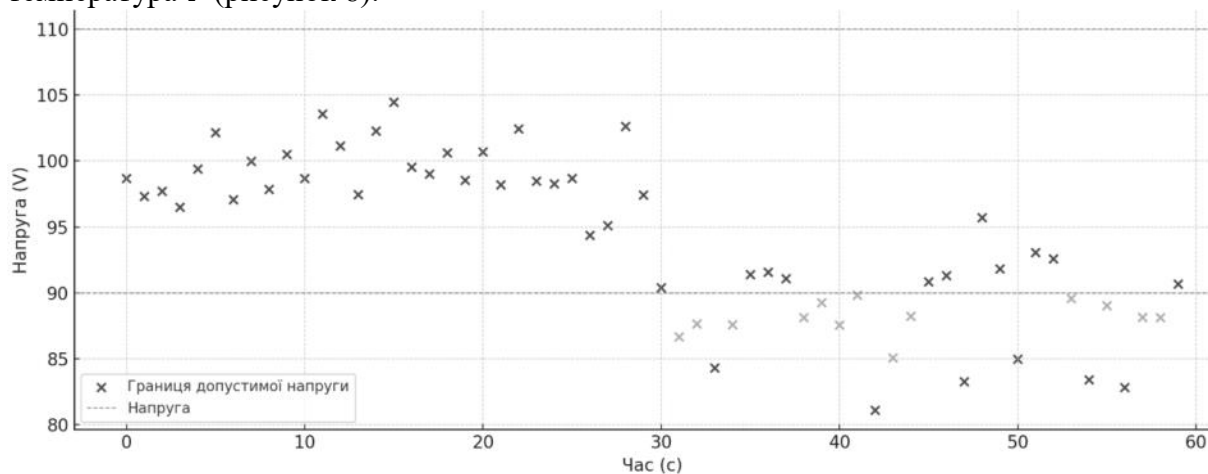


Рисунок 7 – Вплив відхилення напруги U на статус КРІ

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 7 ілюструє зміну напруги U в технологічному процесі, де видно, як вона спочатку знаходиться в межах норми, а після 30-ї секунди знижується нижче допустимого рівня, що викликає негативні статуси КРІ, що демонструє роботу кортежної моделі у динаміці (табл. 2).

Таблиця 2 – Результати моделювання напруги U протягом інтервалу T_3

Час, с	U , В	A (статус КРІ)
0	98.67	NORMAL
1	97.3	NORMAL
2	97.7	NORMAL
3	96.49	NORMAL
4	99.39	NORMAL
5	102.15	NORMAL
6	97.06	NORMAL
7	99.97	NORMAL
8	97.84	NORMAL
9	100.5	NORMAL
10	98.67	NORMAL
11	105.6	NORMAL
12	101.14	NORMAL
13	97.44	NORMAL
14	102.27	NORMAL
15	104.46	NORMAL
16	99.52	NORMAL
17	99.0	NORMAL
18	100.61	NORMAL
19	98.53	NORMAL
20	100.69	NORMAL
21	98.19	NORMAL
22	102.43	NORMAL
23	98.47	NORMAL

Продовження таблиці 2

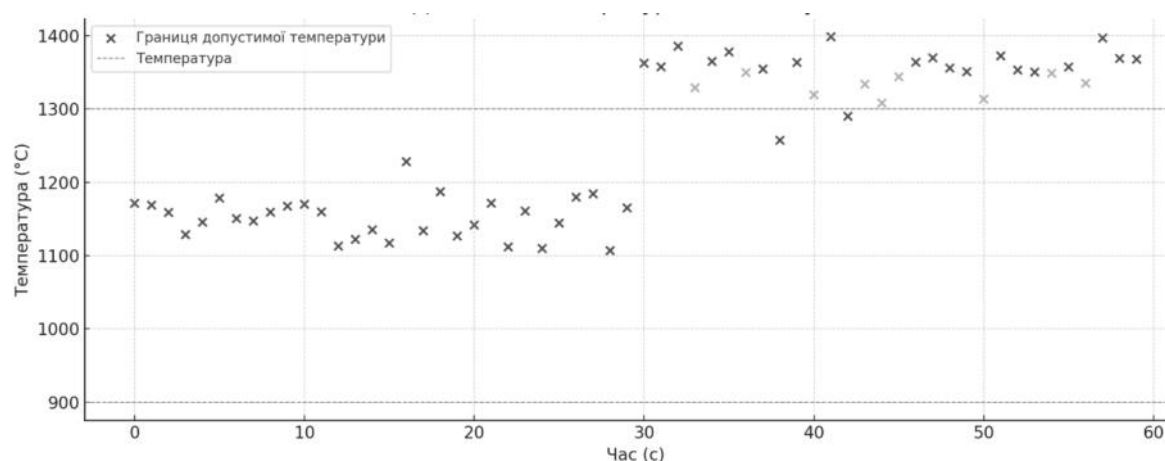
24	98.26	NORMAL
25	98.68	NORMAL
26	94.36	NORMAL
27	95.09	NORMAL
28	102.62	NORMAL
29	97.41	NORMAL
30	90.38	NORMAL
31	86.65	WARNING
32	87.63	WARNING
33	84.29	CRITICAL
34	87.57	WARNING
35	91.37	NORMAL
36	91.56	NORMAL
37	91.07	NORMAL
39	88.11	WARNING
40	89.24	WARNING
41	87.54	WARNING
42	89.81	WARNING
43	81.08	CRITICAL
44	85.06	WARNING
45	88.21	WARNING
46	90.83	NORMAL
47	91.3	NORMAL
48	825	CRITICAL
49	95.7	NORMAL
50	91.81	NORMAL
51	84.96	CRITICAL
52	905	NORMAL
53	92.57	NORMAL
54	89.56	WARNING
55	839	CRITICAL
56	89.02	WARNING
57	82.81	CRITICAL
58	88.13	WARNING
59	88.11	WARNING

Джерело: розроблено авторами

З рисунку 7 та таблиці 2 наглядно видно, що починаючи з 31-ї секунди значення напруги U знижується і з'являються негативні статуси KPI, які передаються системою моніторингу до центру прийняття рішень.

Зниження напруги нижче 90 В у системі ЕДО дестабілізує процес, погіршує якість обробки та створює приховану загрозу для обладнання. У критичних галузях – таких як авіація, БПЛА або оборонна промисловість – це може стати причиною виробничого браку або відмови в експлуатації. У системі моніторингу KPI така ситуація має класифікуватися як WARNING або CRITICAL, а також автоматично фіксуватися в хмарній аналітичній базі для подальшого аудиту.

Графік зміни температури T в технологічному процесі ЕДО та її KPI-статус у динаміці відображено на рисунку 8 (базується на моделювання – табл. 3). Як видно, після 30-ї секунди відбувається перевищення температури T вище допустимого порогу (1300 °C), що викликає негативні статуси KPI.

Рисунок 8 – Вплив відхилення температури T на статус KPI

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Результати моделювання температури T протягом інтервалу T_3

Час, с	T , °C	A (статус KPI)
0	1171.22	NORMAL
1	1168.77	NORMAL
2	1158.77	NORMAL
3	1128.45	NORMAL
4	1145.48	NORMAL
5	1178.32	NORMAL
6	1150.48	NORMAL
7	1147.06	NORMAL
8	1159.14	NORMAL
9	1167.36	NORMAL
10	1169.91	NORMAL
11	1159.53	NORMAL
12	1112.83	NORMAL
13	1122.01	NORMAL
14	1135.1	NORMAL
15	1116.91	NORMAL
16	1228.09	NORMAL
17	11372	NORMAL
18	1187.02	NORMAL
19	1126.58	NORMAL
20	1141.67	NORMAL
21	1171.37	NORMAL
22	1111.68	NORMAL
23	1160.66	NORMAL
24	1109.59	NORMAL
25	1144.29	NORMAL
26	1179.61	NORMAL
27	1184.12	NORMAL
28	1106.71	NORMAL
29	1164.98	NORMAL
30	1362.36	CRITICAL
31	1357.43	CRITICAL
32	1385.59	CRITICAL
33	1328.85	WARNING

Продовження таблиці 3

34	1364.81	CRITICAL
35	1377.76	CRITICAL
36	1349.74	WARNING
37	1354.46	CRITICAL
39	1257.27	NORMAL
40	13642	CRITICAL
41	1319.15	WARNING
42	1398.48	CRITICAL
43	1289.99	NORMAL
44	13382	WARNING
45	1308.1	WARNING
46	13487	WARNING
47	13677	CRITICAL
48	1369.7	CRITICAL
49	1355.78	CRITICAL
50	1350.8	CRITICAL
51	13136	WARNING
52	1372.39	CRITICAL
53	13509	CRITICAL
54	1350.33	CRITICAL
55	1348.7	WARNING
56	1357.23	CRITICAL
57	1335.18	WARNING
58	1396.78	CRITICAL
59	1368.91	CRITICAL

Джерело: розроблено авторами

З рисунку 8 та таблиці 3 наглядно видно, що починаючи з 30-ї секунди значення температури T знижується і з'являються негативні статуси KPI, які передаються системою моніторингу до центру прийняття рішень.

Перевищення температури понад 1300 °C в ЕДО-системі є критичним порушенням, що несе загрозу як оброблюваним матеріалам, так і обладнанню. У моделі моніторингу ключових індикаторів ефективності таке відхилення має бути негайно ідентифіковано як CRITICAL, з подальшим автоматичним реагуванням – зупинка процесу, інформування персоналу, створення запису в системі хмарної аналітики та перегляд режимів обробки.

Існуючі методи AI/ML та інтелектуального аналізу даних застосовуються для обробки великих обсягів часових рядів та складних нелінійних залежностей між технологічними параметрами ЕДО. Саме ці методи доцільно застосовувати при побудові моделі прогнозування параметрів KPI у системі ЕДО. Застосування рекурентних нейронних мереж, а конкретно моделі довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM), яка спеціалізується на аналізі послідовностей і здатна зберігати інформацію про попередні стани, що є важливим для технологічних процесів з інерційною динамікою, є одним з найефективніших підходів. Прогнозування майбутніх теплових та електричних значень, знаходження імовірно критичних тенденцій відхилення від нормативів, утворення сигналів попередження про настання аварійного або нештатного режиму, можливо якраз з високою точністю за рахунок використання моделі LSTM. Ця модель стає основою для побудови адаптивної системи моніторингу та управління KPI в ЕДО, у поєднанні з методами попередньої обробки даних (нормалізація, фільтрація шуму), використанням сенсорних IoT-даних та з хмарною

обчислювальною платформою. Це дозволяє підвищити безпеку та надійність процесів у критичній інфраструктурі, покращити якість обробки та знизити витрати на технічне обслуговування.

Висновки. Запропонована у даній роботі хмарна технологія моніторингу KPI технологічних процесів КІ, дозволяє у режимі реального часу виявляти відхилення у технологічних процесах, а також попереджувати атаки (кіберінциденти, збої). Це реалізовано за рахунок аналізу аномальної поведінки обладнання, зміни режимів навантаження, споживання ресурсів. У цьому контексті хмарні технології відкривають нові можливості для масштабованого, надійного і безпечного моніторингу показників ефективності з віддаленим доступом і централізованим керуванням.

Отримала подальший розвиток кортежна модель KPI, яка за рахунок визначення множин об'єктів моніторингу, параметрів процесу, методів вимірювання, інтервалів спостереження, допустимих (нормативних) значень KPI, значень KPI у певний момент часу, правил обробки та агрегації даних, способів семантичної інтерпретації отриманих станів KPI, а також застосування функції виявлення аномалії, дозволяє систематизувати параметри моніторингу в ІКС об'єктів КІ, формалізувати автоматичну обробку даних, підтримати інтеграцію з аналітичними хмарними платформами, а також визначити відхилення (аномалії), кіберінциденти, деградацію, надмірне навантаження або саботаж і, як наслідок, підготувати агреговані KPI для щоденного моніторингу операторами та ІТ-службами.

Розглянуто приклад реалізації розробленої моделі для технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА, що є частиною КІ у секторі промисловості та оборонно-промислового виробництва, особливо коли йдеться про застосування в авіації, БПЛА або стратегічному машинобудуванні (це визначає підвищені вимоги до безпеки, надійності, контролю KPI та кіберзахисту таких систем). Також, розроблено схему моніторингу KPI для технологічного процесу ЕДО; наведено приклад інфраструктури реалізації моделі в хмарі Azure та модель даних у форматі JSON (що є зручним представленням для API, MQTT-брокера або Kafka), а також загальну схему технологічного процесу ЕДО в інженерії БПЛА на основі хмарних технологій.

Верифікація моделі на основі даних струму A , напруги U та температури T довела її функціональну коректність, стійкість до зміни умов і високу прикладну цінність для моніторингу технологічних процесів у КІ. Модель може стати основою для розробки цифрового двійника виробничої системи, забезпечуючи надійність, передбачуваність і безпеку в умовах цифровізації та кіберризиків, інтеграція з алгоритмами AI/ML, такими як LSTM, відкриває перспективу для розширеної аналітики, адаптивного управління процесом та автоматичного прийняття рішень у режимі реального часу. У перспективі зазначений алгоритм LSTM можна використати для побудови моделі прогнозування параметрів KPI у системі ЕДО, також можна використати інші алгоритми AI/ML та інтелектуального аналізу даних, які здатні обробляти великі обсяги часових рядів та враховувати складні нелінійні залежності між технологічними параметрами.

Список літератури

1. Gnatyuk S., Yudin O., Sydorenko V., Smirnova T., Polozhentsev A. The Model for Calculating the Quantitative Criteria for Assessing the Security Level of Information and Telecommunication Systems. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3156. P. 390–399.
2. Постанова КМУ «Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури» від 9 жовтня 2020 р. № 1109. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#n11>
3. Gnatyuk S., Berdibayev R., Smirnova T., Avkurova Z., Iavich M. Cloud-Based Cyber Incidents Response System and Software Tools. *Communications in Computer and Information Science*. 2021. Vol. 1486. P. 169–184.

4. Ardebili A. A., Martella C., Lazari A. et al. Smart Critical Infrastructures Security Management and Governance: Implementation of Cyber Resilience KPIs for Decentralized Energy Asset. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3731. URL: <https://iris.unisalento.it/handle/11587/530328>
5. Bridging measurement divides in AI, cloud, and cyber. URL: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/measuring-cyber-ai-and-cloud-kpis.html>
6. Yıldırım F., Yalman Y., Bayındır K. Ç., Terciyanlı E. Comprehensive Review of Edge Computing for Power Systems: State of the Art, Architecture, and Applications. *Applied Sciences*. 2025. 15(8). 4592. <https://doi.org/10.3390/app15084592>
7. Wei X. et al. MVR: An Architecture for Computation Offloading in Mobile Edge Computing. *2017 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)*. Honolulu, USA. 2017. P. 232–235. DOI: 10.1109/IEEE.EDGE.2017.42.
8. Joshi A., Raturi A., Kumar S., Dumka A., Singh D. P. Improved Security and Privacy in Cloud Data Security and Privacy: Measures and Attacks. *2022 International Conference on Fourth Industrial Revolution Based Technology and Practices (ICFIRTP)*. Uttarakhand, India. 2022. P. 230–233. DOI: 10.1109/ICFIRTP56122.2022.10063186.
9. Rajasekar P., Kalaiselvi K., Shanmugam R., Tamilselvan S., Pandian A. P. Advancing Cloud Security Frameworks Implementing Distributed Ledger Technology for Robust Data Protection and Decentralized Security Management in Cloud Computing Environments. *2024 Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT)*. Karnataka, India. 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICAIT61638.2024.10690718.
10. Kimm H., Ortiz J. Multilevel Security Embedded Information Retrieval and Tracking on Cloud Environments. *2021 IEEE Cloud Summit*. USA. 2021. P. 25–28. DOI: 10.1109/IEEECloudSummit52029.2021.00012.
11. Gnatyuk S., Sydorenko V., Aleksander M. Unified data model for defining state critical information infrastructure in civil aviation. *Proceedings of the 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Kyiv. 2018. P. 37–42.
12. Priyadarsini S., Singh A. V., Broumi S. Soft Set Theory: A Conceptual Analysis and Literature Review. *2022 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. Coimbatore, India. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCI54379.2022.9740931.
13. Gnatyuk S. Multilevel Unified Data Model for Critical Aviation Information Systems Cybersecurity. *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. 2019. P. 242–247.
14. Gnatyuk S., Polishchuk Yu., Sydorenko V., Sotnichenko Yu. Determining the level of importance for critical information infrastructure objects. *PIC S and T 2019: Problems of Infocommunications, Science and Technology*. Kyiv. 2019. P. 829–834.
15. Huang Ch.-Ch., Hsieh Ch.-Ch. Social relevance, then protection: A social-technical approach to CIIP. *2010 International Conference on CISIM*. Krakow, Poland. 2010. P. 239–243. DOI: 10.1109/CISIM.2010.5643658.
16. Jaxymbetova M., Kanayev A., Kossanova I. et al. Improvement of the Mechanical Properties of Reinforcing Bar Steel by Combined Deformation-Heat Treatment. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2022. 16(9). P. 460–466. <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521>
17. Al-Azzeh J., Ayyoub B., Mesleh A. et al. Cloud-Based Information System for Evaluating Caverns in the Process of Blasting Metal Surfaces of Details. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*. 2025. 18(1). P. 32–42. <https://doi.org/10.15866/iremos.v18i1.25596>
18. Nur R., Suyuti M., Iswar M., Djalal M. Optimizing the Punch Parameters for V-Bending Stainless Steel Using Response Surface Methodology Approach. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2024. 18(1). P. 37–44. <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i1.23973>
19. Yoo S., Kim Y.-W., Choi H. An assessment framework for smart manufacturing. *2018 International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. Korea. 2018. P. 1–1. DOI: 10.23919/ICACT.2018.8323827.
20. Wei Q. Study on the structure of smart manufacturing system from the perspective of super-network. *2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. China. 2018. P. 1482–1487. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407361.
21. Hietala M., Rautio T., Pääkilä J. et al. Exploring the Impact of Surface Quality on the Bending Fatigue Strength of Wire Arc Additive Manufactured Carbon Steel. *ATiGB 2023: Applying New Technology in Green Buildings*. Vietnam. 2023. P. 248–252. DOI: 10.1109/ATiGB59969.20210364399.
22. Hu Z., Gnatyuk S., Akhmetov B. et al. Method for cyber threats detection and identification in modern cloud services. *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEE 2021*. Springer. 2021. P. 326–346. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80472-5_28
23. Dawood M., Tu S., Xiao C. et al. Cyberattacks and Security of Cloud Computing: A Complete Guideline. *Symmetry*. 2023. 15. 1981. <https://doi.org/10.3390/sym15111981>
24. Tu S., Waqas M., Rehman S.U. et al. Security in Fog Computing: A Novel Technique to Tackle an Impersonation Attack. *IEEE Access*. 2018. 6. P. 74993–75001.
25. Fan X., Yao J., Cao N. Research on Cloud Computing Security Problems and Protection Countermeasures. *International Symposium on Cyberspace Safety and Security*. Guangzhou. 2019. P. 542–551.
26. Kuznetsov O., Atzeni G., Arnesano M. et al. Secure IoT-based smart wheelchair system: From implementation to security enhancement strategy. *Security and Privacy of Cyber Physical Systems Emerging Trends Technologies and Applications*. 2025. P. 225–257.
27. Kuznetsov O., Smirnov O., Kuznetsova T. et al. Privacy-utility trade-offs in IoT networks: A comparative analysis of differential privacy mechanisms. *Security and Privacy of Cyber Physical Systems Emerging Trends Technologies and Applications*. 2025. P. 589–622.
28. Kuznetsov O., Smirnov O., Akhmetov B. et al. Deep Learning Frontiers in Copy-Move Forgery Detection: Advances, Challenges, and Future Directions. *Advancements in Cybersecurity Next Generation Systems and Applications*. 2025. P. 202–229.
29. Kuznetsov O., Frontoni E., Kuznetsova Y. et al. Trust-Based Security Architecture for Edge Computing. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3909. P. 227–241.

30. Al-Mudhafar Aqeel A.M., Smirnova T., Buravchenko K., Smirnov O. The method of assessing and improving the user experience of subscribers in software-configured networks based on the use of ML. *Advanced Information Systems*. 2023. 7(2). P. 49–56.
31. Smirnov O., Sydorenko V., Aleksander M. et al. Simulation of the cloud IoT-based monitoring system for critical infrastructures. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3530. P. 256–265.

References

1. Gnatyuk, S., Yudin, O., Sydorenko, V., Smirnova, T., & Polozhentsev, A. (2022). The model for calculating the quantitative criteria for assessing the security level of information and telecommunication systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, 390–399.
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020, October 9). *Deiaki pytannia obektiv krytychnoi infrastruktury* (Resolution No. 1109). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#n11> [in Ukrainian].
3. Gnatyuk, S., Berdibayev, R., Smirnova, T., Avkurova, Z., & Iavich, M. (2021). Cloud-based cyber incidents response system and software tools. *Communications in Computer and Information Science*, 1486, 169–184.
4. Ardebili, A. A., Martella, C., Lazari, A., et al. (2024). Smart critical infrastructures security management and governance: Implementation of cyber resilience KPIs for decentralized energy asset. *CEUR Workshop Proceedings*, 3731. <https://iris.unisalento.it/handle/11587/530328>.
5. Deloitte. (n.d.). *Bridging measurement divides in AI, cloud, and cyber*. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/measuring-cyber-ai-and-cloud-kpis.html>.
6. Yıldırım, F., Yalman, Y., Bayındır, K. Ç., & Terciyanlı, E. (2025). Comprehensive review of edge computing for power systems: State of the art, architecture, and applications. *Applied Sciences*, 15(8), 4592. doi.org/10.3390/app15084592
7. Wei, X., et al. (2017). MVR: An architecture for computation offloading in mobile edge computing. In *2017 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)* (pp. 232–235). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEE.EDGE.2017.42>.
8. Joshi, A., Raturi, A., Kumar, S., Dumka, A., & Singh, D. P. (2022). Improved security and privacy in cloud data: Security and privacy measures and attacks. In *2022 International Conference on Fourth Industrial Revolution Based Technology and Practices (ICFIRTP)* (pp. 230–233). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICFIRTP56122.2022.10063186>.
9. Rajasekar, P., Kalaiselvi, K., Shanmugam, R., Tamilselvan, S., & Pandian, A. P. (2024). Advancing cloud security frameworks: Implementing distributed ledger technology for robust data protection and decentralized security management in cloud computing environments. In *2024 Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAIT61638.2024.10690718>.
10. Kimm, H., & Ortiz, J. (2021). Multilevel security embedded information retrieval and tracking on cloud environments. In *2021 IEEE Cloud Summit* (pp. 25–28). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEECloudSummit52029.2021.00012>
11. Gnatyuk, S., Sydorenko, V., & Aleksander, M. (2018). Unified data model for defining state critical information infrastructure in civil aviation. In *Proceedings of the 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)* (pp. 37–42). IEEE.
12. Priyadarsini, S., Singh, A. V., & Broumi, S. (2022). Soft set theory: A conceptual analysis and literature review. In *2022 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCI54379.2022.9740931>
13. Gnatyuk, S. (2019). Multilevel unified data model for critical aviation information systems cybersecurity. In *2019 IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)* (pp. 242–247). IEEE.
14. Gnatyuk, S., Polishchuk, Yu., Sydorenko, V., & Sotnichenko, Yu. (2019). Determining the level of importance for critical information infrastructure objects. In *2019 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 829–834). IEEE.
15. Huang, C.-Ch., & Hsieh, C.-Ch. (2010). Social relevance, then protection: A social-technical approach to CIIP. In *2010 International Conference on CISIM* (pp. 239–243). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CISIM.2010.5643658>.
16. Jaxymbetova, M., Kanayev, A., Kossanova, I., et al. (2022). Improvement of the mechanical properties of reinforcing bar steel by combined deformation-heat treatment. *International Review of Mechanical Engineering*, 16(9), 460–466. <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521>.
17. Al-Azzeh, J., Ayyoub, B., Mesleh, A., et al. (2025). Cloud-based information system for evaluating caverns in the process of blasting metal surfaces of details. *International Review on Modelling and Simulations*, 18(1), 32–42. <https://doi.org/10.15866/iremos.v18i1.25596>.
18. Nur, R., Suyuti, M., Iswar, M., & Djalal, M. (2024). Optimizing the punch parameters for V-bending stainless steel using response surface methodology approach. *International Review of Mechanical Engineering*, 18(1), 37–44. <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i1.23973>.
19. Yoo, S., Kim, Y.-W., & Choi, H. (2018). An assessment framework for smart manufacturing. In *2018 International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* (p. 1). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICACT.2018.8323827>.
20. Wei, Q. (2018). Study on the structure of smart manufacturing system from the perspective of super-network. In *2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (pp. 1482–1487). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407361>.
21. Hietala, M., Rautio, T., Pääkilä, J., et al. (2023). Exploring the impact of surface quality on the bending fatigue strength of wire arc additive manufactured carbon steel. In *ATiGB 2023: Applying New Technology in Green Buildings* (pp. 248–252). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ATiGB59969.20210364399>
22. Hu, Z., Gnatyuk, S., Akhmetov, B., et al. (2021). Method for cyber threats detection and identification in modern cloud services. In *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV (ICCSEE 2021)* (pp. 326–346). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80472-5_28.

23. Dawood, M., Tu, S., Xiao, C., et al. (2023). Cyberattacks and security of cloud computing: A complete guideline. *Symmetry*, 15, 1981. <https://doi.org/10.3390/sym15111981>.
24. Tu, S., Waqas, M., Rehman, S. U., et al. (2018). Security in fog computing: A novel technique to tackle an impersonation attack. *IEEE Access*, 6, 74993–75001.
25. Fan, X., Yao, J., & Cao, N. (2019). Research on cloud computing security problems and protection countermeasures. In *International Symposium on Cyberspace Safety and Security* (pp. 542–551).
26. Kuznetsov, O., Atzeni, G., Arnesano, M., et al. (2025). Secure IoT-based smart wheelchair system: From implementation to security enhancement strategy. In *Security and Privacy of Cyber Physical Systems: Emerging Trends, Technologies and Applications* (pp. 225–257).
27. Kuznetsov, O., Smirnov, O., Kuznetsova, T., et al. (2025). Privacy-utility trade-offs in IoT networks: A comparative analysis of differential privacy mechanisms. In *Security and Privacy of Cyber Physical Systems: Emerging Trends, Technologies and Applications* (pp. 589–622).
28. Kuznetsov, O., Smirnov, O., Akhmetov, B., et al. (2025). Deep learning frontiers in copy-move forgery detection: Advances, challenges, and future directions. In *Advancements in Cybersecurity: Next Generation Systems and Applications* (pp. 202–229).
29. Kuznetsov, O., Frontoni, E., Kuznetsova, Y., et al. (2024). Trust-based security architecture for edge computing. *CEUR Workshop Proceedings*, 3909, 227–241.
30. Al-Mudhafar Aqeel, A. M., Smirnova, T., Buravchenko, K., & Smirnov, O. (2023). The method of assessing and improving the user experience of subscribers in software-configured networks based on the use of ML. *Advanced Information Systems*, 7(2), 49–56.
31. Smirnov, O., Sydorenko, V., Aleksander, M., et al. (2023). Simulation of the cloud IoT-based monitoring system for critical infrastructures. *CEUR Workshop Proceedings*, 3530, 256–265.

Tetiana Smirnova¹, PhD tech. sci., **Kostiantyn Buravchenko**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Oleksandr Dobrynychuk², jr. researcher, **Serhii Smirnov**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Nataliia Yakymenko¹, Assoc. Prof., PhD phys.-math. sci., **Oleksii Smirnov**¹, Prof., Dr. tech. sci.,

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine

Cloud-based Technology for Monitoring Key Performance Indicators of Technological Processes in Critical Infrastructure

In this work, a cloud technology was developed for monitoring key performance indicators of critical infrastructure technological processes in real time in order to detect deviations in technological processes, as well as to prevent attacks (failures) by analyzing anomalous equipment behavior, changes in load modes, resource consumption, etc. The tuple model of key performance indicators was further developed, which allows systematizing monitoring parameters in information and communication systems of critical infrastructure objects, formalizing automatic data processing, supporting integration with analytical cloud platforms, as well as identifying deviations (anomalies), cyber incidents, degradation, excessive load or sabotage and, as a result, preparing aggregated key performance indicators for daily monitoring by operators and IT services. A model of the technological process of electric arc processing in UAV engineering is proposed, which in the conditions of the current stage of the Russian-Ukrainian war is part of the critical infrastructure in the economy and defense-industrial production sector. This is due to the fact that UAVs now play a crucial role on the battlefield. A scheme for monitoring key performance indicators for the electric arc processing technological process has been developed. For this, the use of cloud technologies is proposed, a general scheme of the electric arc processing technological process in UAV engineering is given, with their use. An example of a model infrastructure based on the Azure cloud platform has been implemented. The data model is presented in JSON format (which is effective for API, MQTT broker or Kafka). Verification of the model on empirical data confirmed its compliance with the requirements, resistance to changing conditions and great significance for monitoring technological processes in critical infrastructure. In the context of digitalization and countering cyber risks, the model is the basis for creating a digital twin of the production system. Thus, reliability, predictability and security are ensured. The paper proposes integration with artificial intelligence/machine learning (AI/ML) algorithms, such as LSTM, which allows for real-time advanced analytics, adaptive process control, and automated decision-making. In the future, the LSTM algorithm can be used to build a model for predicting the parameters of key performance indicators in an electric arc processing system, and other AI/ML and data mining algorithms that can process large volumes of time series and take into account complex nonlinear dependencies between technological parameters can also be used.

cloud technology, technological processes, critical infrastructure, information and communication system, electric arc processing, UAV, cyber risks, cybersecurity, IoT, artificial intelligence, machine learning

Одержано (Received) 11.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

UDC 004.89:004.7:656.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.55-61](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.55-61)

Dmytro Uhryn¹, Prof., DSc., **Oleksandr Dorenskyi**², Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Oleksii Iliuk³, **Yuriy Ushenko**¹, Prof., DSc., **Shkidina Kateryna**¹

¹*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine,*

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

³*Temabit LLC, Kyiv, Ukraine*

*e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua, dorenskyiop@kntu.kr.ua, olexiyilyukm@gmail.com,
y.ushenko@chnu.edu.ua, shkidina.kateryna@chnu.edu.ua*

Experimental Analysis of Deep Neural Networks for Automated Object Classification Using MRI Images

The article presents a system analysis and comparative study of the efficiency of modern deep neural networks for the task of automated brain tumor classification based on MRI images. Three architectures were used in the study ResNet50, DenseNet121, and EfficientNet-B0, which belong to the most widely adopted models in computer vision. The experimental part is based on a medical dataset that was preprocessed using standard augmentation and normalization methods. Quantitative results showed that ResNet50 achieved an accuracy of 92%, DenseNet121 reached 74%, and EfficientNet-B0 demonstrated the highest performance with an accuracy of 97%. Additional qualitative metrics supported these findings: the F1-score for EfficientNet-B0 reached 0.96, indicating a strong balance between precision and recall, while ResNet50 achieved an F1-score of 0.91, and DenseNet121 scored 0.73. Visualization of classification results showed that all models correctly identified the tumor class, but their confidence levels varied from 0.74 in DenseNet121 to 0.97 in EfficientNet-B0. The qualitative analysis confirmed the suitability of EfficientNet-B0 for cases where fast and accurate inference is prioritized under limited computational resources. Despite higher computational costs, ResNet50 can be effective in tasks that require robustness and maximum precision. The obtained results highlight the significant potential of deep learning models in medical diagnostics and the development of intelligent decision-support systems in neuroradiology.

AI, machine learning, convolutional neural networks, transfer learning, deep learning, image classification, medical diagnostics

Problem Statement. The field of computer science is rapidly evolving, driven by the swift advancement of information technologies. Among the many sectors into which IT is integrated, the healthcare sector, including medical diagnostics, undoubtedly stands out. Timely and accurate diagnosis of brain tumors is one of the key factors influencing treatment effectiveness and reducing mortality rates. As is well known, digital MRI images are analysed by medical professionals. This process involves a human factor, which can lead to errors, such as inaccuracies in tumour type identification. This issue can largely be addressed by IT solutions. Deep learning provides an opportunity to automate the classification of formations (tumours). However, there is a problem: the effectiveness of models depends on the quality of data preparation and the chosen neural network architecture. On the other hand, there are additional challenges: the data preprocessing process, which involves improving image quality, balancing the classes, and using augmentation techniques to stabilise the model; the limited amount of training data, and the uneven distribution of tumour types (which can complicate maintaining high accuracy, especially for rare tumour categories). Therefore, the choice of deep learning architecture requires balancing classification accuracy with computational efficiency. Additionally, model interpretability (the "black box" problem) must also be considered, which is particularly important in healthcare, where clinicians need to trust and explain the model's predictions.

From practice and numerous publications, including [2-5], a well-supported conclusion emerges: the focus of AI application in global healthcare is the process of diagnosing brain

conditions using MRI images. Recent publications reveal a clear trend toward the use of deep learning, particularly CNN, which demonstrate high efficiency in tasks of multiclass tumor classification and segmentation. According to the systematic review by Kazerooni et al. (2021), CNN models, when combined with preprocessing and data augmentation, can achieve accuracy rates exceeding 95% in recognizing major types of brain tumors [1]. Similar findings are reported by Pei, Vidyaratne, and Iftekharuddin (2022), who emphasize that the most effective architectures for medical applications are ResNet, DenseNet, and EfficientNet, as they provide an optimal balance between accuracy and computational complexity [2, 3].

Practical studies also confirm the effectiveness of CNN in diagnostic applications. For example, Zhou et al. (2020) employed a multilevel CNN for the classification of three tumor types, however meningioma, glioma, and pituitary adenoma is achieving an accuracy above 96% [4]. Shboul et al. (2021) demonstrated that even moderately deep models can successfully classify gliomas, offering a valuable support tool for radiologists [5].

Analysis of Recent Research and Publications. The digital transformation of processes in the healthcare sector is actively underway. This is evidenced by the results of numerous studies, including [11]. At the same time, cutting-edge information technologies are being actively integrated into medicine. At the same time, the results of the analysis of publications [2-5] demonstrate the relevance of using effective artificial intelligence technologies for the classification of brain objects (formations) based on digital MRI images. The scientific trends in this area involve the application of machine learning for tumor identification and segmentation [2, 3].

A key development in this field is the creation and analysis of large open datasets, with the international BraTS project being a prime example. In recent editions of this challenge, the focus has shifted from just segmentation to also include synthetic data generation and cross-institutional result comparison. This has significantly improved the reproducibility and reliability of models. These initiatives highlight the strong potential of open datasets for training and evaluating algorithms in medical diagnostics.

However, several reviews (Ranjbarzadeh, 2023) point out important challenges, such as the lack of labelled data, the high computational resources needed for training, and the absence of standardised evaluation protocols. Additionally, Wen (2021) stresses that when deploying AI algorithms in clinical practice, they must meet strict validation standards, as even minor diagnostic errors can have serious consequences for patients.

According to the findings of the study [1], ResNet, DenseNet, and EfficientNet show high effectiveness in the medical field. As mentioned earlier, these models offer high accuracy while maintaining good computational efficiency. However, for wider clinical use, further research is needed to improve how models generalise, utilise multicentre datasets, and integrate AI technologies into practical, user-friendly diagnostic systems.

Problem Definition. The aim of this study is to conduct an experimental analysis of the effectiveness of deep neural networks (ResNet, DenseNet, and EfficientNet) for the automated classification of brain tumour formations using MRI images. To achieve this goal, the following tasks must be addressed: 1) perform a comparative analysis of deep neural network architectures for brain tumour classification based on MRI images; 2) optimise deep learning models for deployment in environments with limited computational resources; 3) establish criteria for the medical application of deep learning models in brain tumour diagnostics; 4) carry out both quantitative and qualitative analysis of the effectiveness of deep neural networks in terms of inference speed and accuracy under computational constraints.

Main Results. Method for preparing brain tumor data based on MRI images.

Step 1. Identification and selection of characteristics. We will employ feature extraction methods for the automatic identification of characteristics, eliminating the need for

manual feature engineering.

The study uses pre-trained CNN (DenseNet121, ResNet50, and EfficientNet-B0) in transfer learning mode.

1. ResNet (Residual Networks). The key idea behind ResNet is to use residual connections that overcome the problem of gradient vanishing in very deep networks. Formally, instead of training a direct mapping

$$H(x) \approx F(x), \quad (1)$$

ResNet trains the residual function:

$$H(x) = F(x) + x, \quad (2)$$

where x – entrance to the block, $F(x)$ – nonlinear transformation (convolution, normalization, ReLU), $H(x)$ – block output.

Thus, the model learns to construct only “deviations” from identity, which simplifies optimization. This allows training networks with hundreds or even thousands of layers without degrading accuracy.

2. DenseNet introduces dense connections (dense blocks), in which the output of each layer is used as input for all subsequent layers. Mathematically, it can be represented as:

$$x_l = H_l([x_0, x_1, \dots, x_{l-1}]), \quad (3)$$

where x_l – output l layer; $x_0, x_1, \dots, x_{l-1}$ – concatenation of all previous outputs; $H_l(\cdot)$ – composition of folding, normalization, and activation.

This mechanism:

- ensures reuse of features;
- reduces the number of parameters (because there is no need to duplicate filters);
- improves gradient propagation in deep networks.

3. EfficientNet-B0 optimizes architecture using compound scaling, which simultaneously takes into account three parameters: depth, width, and resolution of the input image.

Scaling formulas are characterized by:

$$d = \alpha^\phi, \quad \omega = \beta^\phi, \quad r = \gamma^\phi, \quad (4)$$

where d – depth (number of layers); ω – width (number of channels); r – resolution of input images; ϕ scaling factor, α, β, γ – parameters that determine proportions.

Thus, the model is scaled in a balanced manner, rather than in only one direction (e.g., depth only), which allows for high accuracy with a minimum number of parameters.

Neural networks perform automatic feature selection by optimizing filter weights W in the learning process. The convolution operation is formalized as:

$$y_{i,j,k} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{c=1}^C W_{m,n,c,k} \cdot x_{i+m,j+n,c}, \quad (5)$$

where x – input image, W – convolution kernel, $y_{i,j,k}$ – activation at position (i,j) in the k output channel.

During training weights W are configured to focus on the most informative characteristics of the image (e.g., tumor contours or textural features).

Step 2. Balancing classes. A class imbalance problem was detected in the dataset. To compensate for the imbalance, a class weighting method was applied in the loss function. Each class i assigned weight ω_i , inversely proportional to the number of samples N_i in this class:

$$\omega_i = \frac{N_{total}}{C \cdot N_i}, \quad (6)$$

where N_{total} total number of samples in the dataset, C – number of classes. Thus, smaller classes receive greater weight, which increases the penalty for misclassification of these classes.

These weights are then integrated into the CrossEntropyLoss function in PyTorch.:

$$L = - \sum_{i=1}^C \omega_i y_i \log(\hat{y}_i), \quad (7)$$

where y_i – true class label (one-hot), and $\hat{y}_i$ – predicted probability for class i . Thanks to this approach, the model learns to account for class imbalance, which improves accuracy on underrepresented categories.

Step 3. Data cleansing and preparation.

Damaged or duplicate images can mislead the neural network and reduce the model's ability to generalize. To address this issue, damaged files and duplicates were identified and removed during the data preparation stage. Duplicates were identified by calculating MD5 hashes:

$$MD5(I_i) = MD5(I_j) \Rightarrow I_i = I_j \quad (8)$$

where I_i, I_j – two images, and the $MD5(\cdot)$ hash function. Removing duplicates and damaged samples makes the loss function more representative for training:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l(\hat{y}_i, y_i), \quad (9)$$

where $l(\cdot)$ – local loss function CrossEntropy, and $\hat{y}_i$ – model prediction for an image I_i .

To standardize the size, all images are converted to a standard format of 224×224 pixels, which ensures compatibility with pre-trained models and correct operation of convolutional layers:

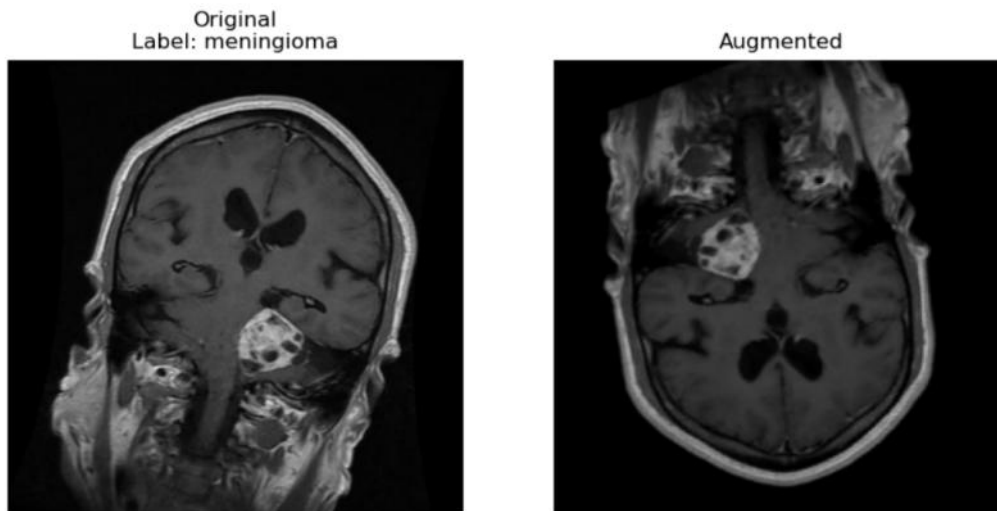


Figure 1 – Visualization of images before and after augmentation

Source: developed by the authors

The graphs (Fig. 2) show the results of training the DenseNet121 model for 105 epochs, reflecting the dynamics of Loss and Accuracy on the training and validation samples. The model demonstrated a stable training process with no signs of overfitting: accuracy on the validation set reached about 86%, losses gradually decreased, and the differences between the Train and Val metrics can be explained by the use of augmentations (in particular, the addition of noise to the training data). This indicates the model's ability to generalize information well and work effectively with new images.

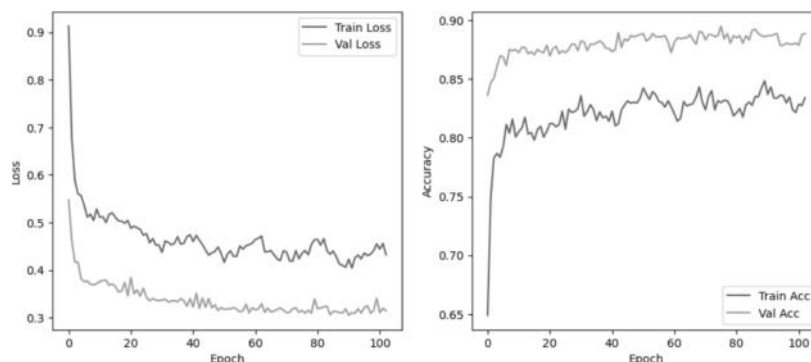


Figure 2 – The DenseNet121 training process

Source: developed by the authors

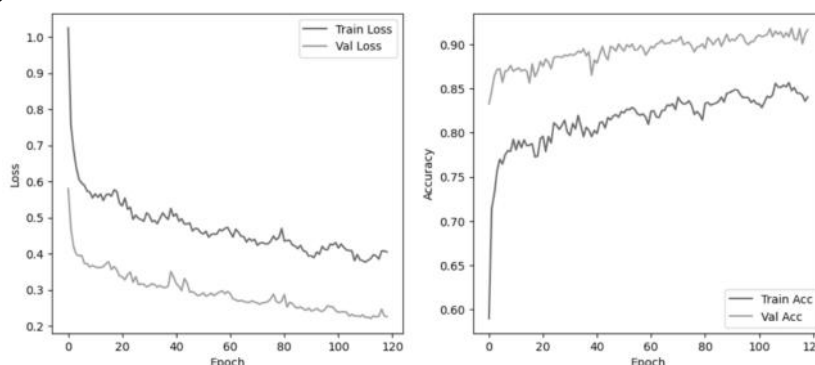


Figure 3 – The ResNet50 training process

Source: developed by the authors

The graph below (Fig. 3) shows the results of training the ResNet50 model over 120 epochs. The model demonstrated high efficiency, maintaining a balance between training and validation metrics, with no signs of overfitting, and achieved over 91% accuracy on the validation sample. Figure 4 shows the training curve of the EfficientNet-B0 model over 89 epochs. Due to the lack of improvement over the last 15 epochs, the early stopping mechanism was activated.

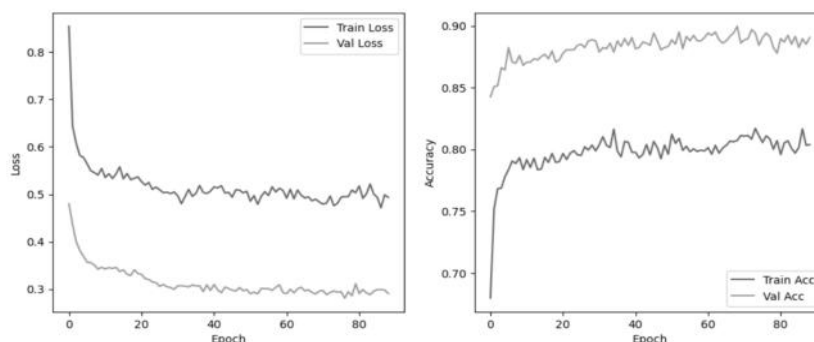


Figure 4 – The EfficientNet-B0 training process

Source: developed by the authors

As a result, the ResNet model showed the most stable and balanced results, but all three architectures proved to be suitable for solving the task of brain tumor classification. In the task of classifying brain tumors using MRI images, the ResNet50 model showed the best results. It achieved 90% accuracy, the highest F1-metrics values, and AUC-ROC = 0.9863. ResNet50 classified the pituitary and no tumor classes particularly well, providing high precision and recall rates.

Conclusions. The article presents a system analysis and an experimental study of the effectiveness of three deep learning architectures - ResNet50, DenseNet121, and EfficientNet-B0 - for the task of brain tumor classification based on MRI images:

1. Proved to be the most accurate and robust model: achieved the highest accuracy (90–91%), demonstrated the best F1-score and AUC-ROC values (0.9863), showed the highest resistance to noise and image artifacts. In addition, Grad-CAM visualizations revealed that ResNet50 most precisely highlights relevant image regions, which enhances interpretability and true in the results.

2. EfficientNet-B0 achieved slightly lower accuracy but demonstrated balanced recall across all classes and significantly lower computational requirements. This result indicates that EfficientNet-B0 is optimal for situations where hardware limitations and inference speed are critically important factors.

3. As shown in the Main Results, the experimental study of DenseNet121 revealed that recall scores for the glioma and meningioma classes are lower, however, the model performs effectively in classifying the absence of tumors and primary cases. This result holds practical value. However, this architecture showed the highest sensitivity to noise and less informative Grad-CAM visualizations, reducing its practical diagnostic value.

4. From a system analysis perspective, recall should be considered the primary criterion for medical applications, as missing a pathology is critically undesirable. According to this metric, ResNet50 and EfficientNet-B0 demonstrated the most balanced and practically significant performance.

Thus, the conducted research confirms the high efficiency of deep neural networks in brain tumor classification. ResNet50 can be considered the most promising model for clinical practice, while EfficientNet-B0 is recommended for deployment in environments with limited computational resources.

List of References

1. Ferlay J., Ervik M., Lam F., Colombet M., Mery L., Piñeros M., Bray F. Global Cancer Observatory: Cancer today (GLOBOCAN 2022). *International Agency for Research on Cancer*. 2022. URL: gco.iarc.fr/today.
2. American Brain Tumor Association. Brain tumor statistics: CBTRUS statistical report 2017–2021. 2022. URL: <https://cbtrus.org/factsheet/factsheet.html>.
3. Alford K., Ohgaki H. WHO classification of central nervous system tumours: 5th edition and beyond. *Brain Pathology*. 2022. Vol. 32, № 5. e13062. DOI: <https://doi.org/10.1111/bpa.13062>.
4. Kazerooni A. F., Moradi S., Vafaei A. A., Ahmadi M. Deep learning for brain tumor classification and segmentation in radiology: A systematic review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2021. Vol. 54, № 6. P. 1623–1645. DOI: <https://doi.org/10.1002/jmri.27601>.
5. Pei L., Vidyaratne L., Iftikharuddin K. M. Brain tumor classification using deep learning models: A comprehensive survey. *Neurocomputing*. 2022. Vol. 489. P. 84–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.03.022>.
6. Zhou T., Ruan S., Canu S., Vera P. Brain tumor classification using convolutional neural networks in MRI images. *Medical Image Analysis*. 2020. Vol. 68. 101894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101894>.
7. Ranjbarzadeh R., Maroufi S. F., Khadem S. E. Deep learning-based brain tumor classification: A comprehensive review. *Computers in Biology and Medicine*. 2023. Vol. 154. 106601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.106601>.
8. Bakas S., Reyes M., Jakab A., Bauer S., Rempfler M., Crimi A., ... Menze B. H. The Brain Tumor Segmentation (BraTS) challenge 2023: Advances and future directions. *Frontiers in Radiology*. 2023. Vol. 3. 1206789. DOI: <https://doi.org/10.3389/fradi.2023.1206789>.
9. Shboul Z. A., Chen J., Iftikharuddin K. M. Glioma classification using deep convolutional neural networks. *Journal of Medical Imaging*. 2021. Vol. 8, № 5. 054502. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JMI.8.5.054502>.

10. Wen P. Y., Weller M., Lee E. Q., Alexander B. M., Barnholtz-Sloan J. S., Barthel F. P., ... Aldape K. D. Glioblastoma in adults: A Society for Neuro-Oncology (SNO) and European Society of Neuro-Oncology (EANO) consensus review on current management and future directions. *Neuro-Oncology*. 2021. Vol. 22, № 8. P. 1073–1113. DOI: <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa106>.
11. Dorenskyi O., Drobko O., Drieiev O. Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. *Центральноукраїнський науковий вісник*. 2022. Т. II, Вип. 5. DOI: [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).

References

1. Ferlay, J., Ervik, M., Lam, F., Colombet, M., Mery, L., Piñeros, M., ... Bray, F. (2022). *Global Cancer Observatory: Cancer today (GLOBOCAN 2022)*. International Agency for Research on Cancer. gco.iarc.fr/today.
2. American Brain Tumor Association. (2022). *Brain tumor statistics: CBTRUS statistical report 2017–2021*. <https://cbtrus.org/factsheet/factsheet.html>.
3. Alford, K., & Ohgaki, H. (2022). WHO classification of central nervous system tumours: 5th edition and beyond. *Brain Pathology*, 32(5), e13062. <https://doi.org/10.1111/bpa.13062>.
4. Kazerooni, A. F., Moradi, S., Vafaei, A. A., & Ahmadi, M. (2021). Deep learning for brain tumor classification and segmentation in radiology: A systematic review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 54(6), 1623–1645. <https://doi.org/10.1002/jmri.27601>.
5. Pei, L., Vidyaratne, L., & Iftekharuddin, K. M. (2022). Brain tumor classification using deep learning models: A comprehensive survey. *Neurocomputing*, 489, 84–109. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.03.022>.
6. Zhou, T., Ruan, S., Canu, S., & Vera, P. (2020). Brain tumor classification using convolutional neural networks in MRI images. *Medical Image Analysis*, 68, 101894. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101894>.
7. Ranjbarzadeh, R., Maroufi, S. F., & Khadem, S. E. (2023). Deep learning-based brain tumor classification: A comprehensive review. *Computers in Biology and Medicine*, 154, 106601. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.106601>.
8. Bakas, S., Reyes, M., Jakab, A., Bauer, S., Rempfler, M., Crimi, A., ... Menze, B. H. (2023). The Brain Tumor Segmentation (BraTS) challenge 2023: Advances and future directions. *Frontiers in Radiology*, 3, 1206789. <https://doi.org/10.3389/fradi.2023.1206789>.
9. Shboul, Z. A., Chen, J., & Iftekharuddin, K. M. (2021). Glioma classification using deep convolutional neural networks. *Journal of Medical Imaging*, 8(5), 054502. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.8.5.054502>.
10. Wen, P. Y., Weller, M., Lee, E. Q., Alexander, B. M., Barnholtz-Sloan, J. S., Barthel, F. P., ... Aldape, K. D. (2021). Glioblastoma in adults: A Society for Neuro-Oncology (SNO) and European Society of Neuro-Oncology (EANO) consensus review on current management and future directions. *Neuro-Oncology*, 22(8), 1073–1113. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa106>.
11. Dorenskyi, O., Drobko, O., & Drieiev, O. (2022). Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk*, II(5). [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).

Д. І. Угрин¹, проф., д-р техн. наук, О. П. Доренський², доц., канд. техн. наук,

О. Д. Іл'юк³, проф., д-р фіз.-мат. наук, К. С. Шкідіна¹

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

³ТОВ «Темабіт», м. Київ, Україна

Експериментальний аналіз ефективності глибоких нейронних мереж для автоматизованої класифікації об'єктів за зображеннями МРТ

У праці представлено результати системного аналізу та порівняльного дослідження ефективності сучасних глибоких нейронних мереж ResNet50, DenseNet121 та EfficientNet-B0 для задачі автоматизованої класифікації пухлин головного мозку за цифровими зображеннями МРТ. Експериментальна частина ґрунтується на медичному наборі даних, попередньо підданому стандартним методам аугментації та нормалізації. Кількісні результати показали, що ResNet50 досягла точності 92%, DenseNet121 – 74%, а EfficientNet-B0 продемонструвала найвищий результат із точністю 97%. Додаткові якісні метрики підтвердили отримані висновки: показник F1-міри для EfficientNet-B0 склав 0,96, що свідчить про баланс між точністю та повнотою, тоді як ResNet50 забезпечила F1-міру на рівні 0,91, а DenseNet121 – 0,73. Візуалізація результатів класифікації продемонструвала, що всі моделі правильно визначають клас пухлини, проте рівень впевненості відрізняється: від 0,74 у DenseNet121 до 0,97 у EfficientNet-B0. Якісний аналіз підтвердив доцільність застосування EfficientNet-B0 у випадках, де пріоритетом є швидка та точна інференція за обмежених обчислювальних ресурсів. ResNet50, попри вищі обчислювальні витрати, може бути ефективною для задач, де потрібна стійкість і максимальна точність. Отримані результати свідчать про значний потенціал використання глибоких моделей у медичній діагностиці та створенні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у нейрорадіології.

III, машинне навчання, згорткові нейронні мережі, переносне навчання, глибоке навчання, класифікація зображень, медична діагностика

Одержано (Received) 16.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 08.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

UDC 004.056.5:004.7

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.62-68](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.62-68)

Orest Polotai¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Dorenskyi**², Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anastasiia Kovalenko**², **Kostiantyn Buravchenko**², Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

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

e-mail: orest.polotaj@gmail.com, dorenskyiop@kntu.kr.ua

STRIDE-based threat Modeling of Cybersecurity Risks in Local Computer Networks

The article examines the problem of ensuring LAN cybersecurity under conditions of increasing threat volume and complexity. Accordingly, the study focuses on developing a generalised adaptive method for threat modelling in LANs based on the STRIDE framework. To this end, the paper analyses current scientific sources on the application of STRIDE in the field of information security and identifies a gap between theoretical threat models and their practical implementation in the context of local networks. Based on a constructed DFD model, a structured representation of typical LAN components, external entities, network processes and data flows is formed. The STRIDE threat classification is applied to each model element, enabling the systematisation of potential risks and the development of a threat matrix for further analysis. An adaptive threat-modelling method is formulated, comprising network architecture analysis, automated generation of a threat list, selection of relevant countermeasures, modelling of a secure network architecture, and verification in a simulation environment. The effectiveness of the method is evaluated according to criteria such as completeness of threat coverage, adaptability, practical feasibility, and the degree of automation. The research findings demonstrate that the use of STRIDE in combination with DFD modelling enhances the structural consistency of cybersecurity analysis and provides a systematic approach to designing a LAN protection model.

cybersecurity, LAN, STRIDE, threat modelling, network protection, system vulnerability, risk analysis

Problem Statement. In the current era of digital transformation, local area networks (LANs) constitute a critically important component of the information infrastructure of enterprises, institutions, government agencies and other organisations. At the same time, both the number and complexity of cyber threats continue to grow. Ensuring an adequate level of LAN security therefore requires not only the deployment of technical safeguards, but also the application of effective threat-modelling and risk-analysis methods. One such approach is the STRIDE framework, which enables the systematic classification of potential threats based on a trust model. However, the practical use of STRIDE for analysing the security of local computer networks remains insufficiently explored. This is largely due to the difficulty of adapting the model to the specific characteristics of LANs, including topology, communication protocols, user privilege levels and the structure of interactions between network nodes. These factors highlight the need for a critical analysis of how STRIDE can be applied effectively in addressing LAN security tasks.

Analysis of Recent Research and Publications. The STRIDE framework enables a systematic analysis of system components (including LAN elements) for vulnerabilities across all defined threat categories. At present, STRIDE is widely discussed in the scientific literature as an effective tool for classifying threats in information systems. Publications [1, 2] consider STRIDE as a foundation for constructing threat models with a clear distinction between its six categories: Spoofing, Tampering, Repudiation, Information Disclosure, Denial of Service, and Elevation of Privilege. These studies primarily focus on applying the method

in a general information security context, without a detailed consideration of the specific characteristics of local computer networks.

Scientific publications devoted to computer network security and information security (in particular, [3–5, 7]) emphasise vulnerability detection, analysis of data leakage channels, and methods for protecting information across different layers of network architecture. However, most of these works lack the application of formalised threat models, which limits the ability to adopt a systematic approach to risk assessment.

Some researchers (e.g., [6, 5]) propose simplified practical guidelines for building threat models using STRIDE. Nonetheless, these approaches require adaptation to real-world LAN scenarios, where numerous internal interactions, specific access restrictions, and non-standard topologies are present. Publication [2] describes the use of STRIDE in cloud environments, IoT infrastructures, and web applications. However, the issue of adapting this approach to security modelling specifically within local networks remains insufficiently addressed. Individual researchers, such as [7], highlight the importance of context-aware threat modelling, yet applied methodologies for LANs remain fragmented.

Therefore, a gap exists between the theoretical foundation of STRIDE and its practical application in securing local area networks. This gap underscores the relevance, novelty, and scientific value of the present study.

Tasks Statement. The aim of this study is to develop a generalised STRIDE-based approach (an adaptive method) for analysing the security model of a local area network. To achieve this aim, the following research objectives must be addressed: 1) identify the typical components and data flows within a local network; 2) apply the STRIDE method to the constructed trust model; 3) develop a method (approach) for identifying and mitigating threats; 4) evaluate the effectiveness of the proposed method.

Main Results. The process of applying STRIDE typically begins with constructing a system model in the form of a Data Flow Diagram (DFD), which serves as the key artefact in STRIDE-based threat modelling. The diagram identifies processes, data stores, external entities and information flows. Each system element is then analysed through the lens of the six STRIDE threat categories, allowing specific risks to be identified for each component.

To construct a threat model for a local area network, a DFD is used that incorporates user nodes, servers, access points and external interactions. This diagram functions as a security model of the LAN, taking into account the key components that ensure secure information exchange between external sources and internal resources. The external source is represented by an abstract “external entity” that communicates with the network via the Internet. At the boundary of the LAN is a firewall, which performs packet filtering for inbound and outbound traffic, blocking unwanted or potentially malicious connections.

Once traffic passes through the firewall, it reaches the router, which routes packets according to the internal network configuration. The router directs data along two possible paths: one towards the internal network, where the resources accessed by users are located, and the other towards the Network Intrusion Detection System (NIDS), which analyses traffic to identify anomalous or malicious activity.

The intrusion detection system, in turn, also interacts with the internal network and sends the results of its operation to a log storage repository, where the data are preserved for further analysis, auditing or incident response. The final participant in the internal network is the user, who interacts with the resources within the system, and whose activity may also be monitored to detect potential threats. Overall, this diagram illustrates a typical secure LAN architecture based on a multilayered approach to threat detection and prevention, in which each component performs a specific role in ensuring information security.

After the DFD is constructed, the process proceeds to threat identification, which is presented in Table 1.

Table 1 – Identification of Threats in the Local Network

Name	Description
Spoofing	the possibility of spoofing IP addresses or MAC identifiers
Tampering	modification of data within network packets
Repudiation	users denying actions performed due to lack of proper logging
Information Disclosure	information leakage through unencrypted channels
Denial of Service	flooding attacks or ARP spoofing
Elevation of Privilege	escalation to administrative privileges via exploits

Source: developed on the basis of [10]

Based on this classification, a risk matrix (Table 2) is constructed and subsequently used for the development of the protection algorithm.

Table 2 – Risk Matrix and Threats of the Local Network

STRIDE Category	Threat	Potential Target Component	Risk Level	Countermeasures
S	IP/MAC address spoofing	Workstations, gateways	High	MAC filtering, DHCP snooping, 802.1X
T	Traffic modification (MITM)	Switches, routers	High	Encryption (IPSec), access control (ACL)
R	Repudiation of action (logging disabled)	Servers, guest terminals	Medium	System logging, digital signatures
I	Interception of unencrypted data	Wi-Fi access points	High	SSL/TLS, WPA3, VPN
D	Traffic flooding, ARP-based attacks	Servers, routers	High	Traffic limiting, IDS/IPS, QoS
E	Obtaining administrative privileges	Nodes with software or OS vulnerabilities	High	Software updates, RBAC, multi-factor authentication

Source: developed on the basis of [8, 9]

Thus, the presented matrix serves as the analytical foundation for constructing an adaptive protection algorithm for a local network, taking into account contemporary threats.

The method involves the following stages (tasks):

- analysis of the DFD model;
- automated generation of a list of threats using STRIDE;
- development of countermeasure recommendations (authentication, encryption, traffic monitoring, etc.);
- verification within a simulation environment (e.g., Cisco Packet Tracer or GNS3).

The method (adaptive approach) for protecting a local computer network in light of identified threats is structured according to the UML Sequence Diagram shown in Fig. 1.

The generalised (adaptive) method for LAN protection follows the following sequence of actions: ‘Start Event’ – ‘Tasks’: Analyse DFD Model, Identify Model Elements, Generate Threat List (STRIDE), Select Countermeasure, Model Secure Network, Verify via Simulation – ‘Exclusive Gateway (XOR)’: Threat Identified? Is Analysis Completed? – ‘End Event’.

The method begins with the initiation of the analysis of the network structure. The first step is the examination of the DFD, which serves as the basis for identifying the main components and data flows within the local network. This is followed by the identification of model elements (external entities, processes, data stores and the data flows between them). The next step is to check whether threats have been identified for each element of the model. If a threat has not yet been detected, a list of threats is generated using the STRIDE framework (the six threat categories: Spoofing, Tampering, Repudiation, Information Disclosure, Denial of Service, Elevation of Privilege).

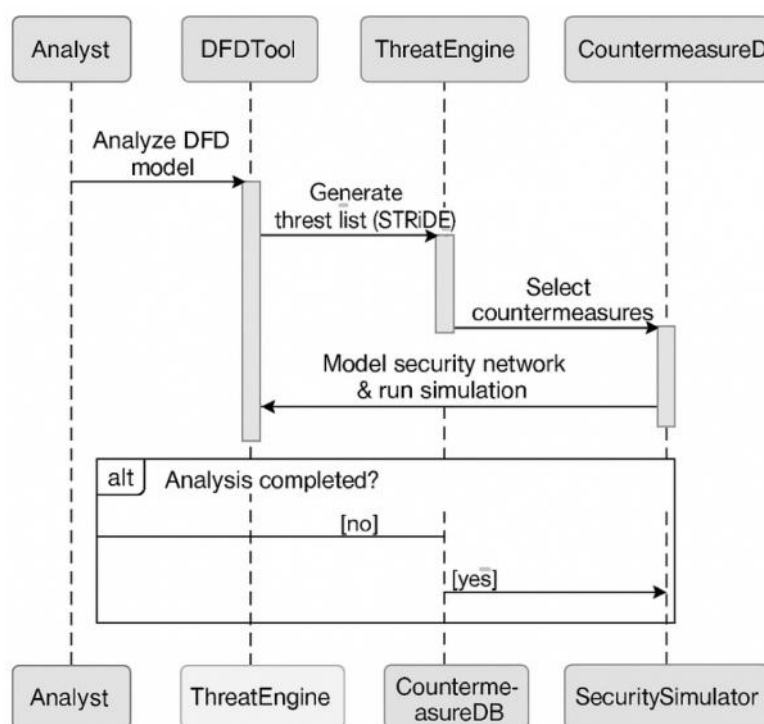


Figure 1 – Sequence Diagram of LAN Protection

Source: developed by the authors

Once the threat list has been produced, appropriate countermeasures are selected, ensuring they correspond to the specific threat type. For example, authentication is applied against spoofing, while encryption mitigates information disclosure. The next stage involves modelling a secure network architecture that incorporates these countermeasures. This step enables the creation of a solution design that accounts for the protection of all critical components.

The subsequent stage of the method is the verification of the model within a simulation environment. This allows the effectiveness of the proposed security architecture to be tested under conditions close to real-world operation. If the verification is successful (and the analysis is complete), the process reaches the final stage—completion. At this point, the security model is deemed ready for implementation. If vulnerabilities or ineffective measures

are discovered during simulation, the cycle is repeated starting from the analysis stage, until an optimal security configuration is achieved.

The effectiveness of the STRIDE-based LAN protection algorithm can be assessed according to several key criteria: completeness of threat coverage, adaptability to changes, practical feasibility of implementation, level of automation and the ability to verify the model (Table 3).

In summary, the following key points should be emphasised. The identification of typical components and data flows within a local network made it possible to construct a basic trust model in which nodes (servers, workstations, network devices), users and the directions of information exchange between them are clearly defined. This approach enabled the specific characteristics of LAN operation within typical organisational structures to be taken into account.

Table 3 – Criteria for Assessing the Effectiveness of LAN Protection

Effect	Description
Completeness of threat coverage	STRIDE provides a comprehensive approach to threat classification, covering six primary attack vectors: spoofing, tampering, repudiation, information disclosure, denial of service and elevation of privilege. As a result, the developed algorithm enables the identification of critical risks at all levels of interaction between elements within the DFD model.
Adaptability	The algorithm is flexible and suitable for application across various network structures, ranging from small office environments to large corporate infrastructures. It supports iterative re-analysis in cases where shortcomings are identified or new threats emerge.
Practical feasibility of implementation	The use of DFD diagrams, the STRIDE methodology and simulation tools (such as GNS3 and Cisco Packet Tracer) makes the algorithm applicable both in educational contexts and real-world projects. Each stage is logically justified and grounded in solid technical principles.
Level of automation	The algorithm can be partially automated — including threat generation based on the model, selection of countermeasures and creation of policies. This enables integration into CI/CD pipelines or information security management systems.
Verification	The final stage involves testing the model in a simulation environment. This not only verifies the correctness of the implemented security measures but also helps identify potential conflicts or shortcomings prior to deployment in a production network.

Source: developed by the authors

An algorithm for identifying and eliminating threats was developed, based on the application of STRIDE principles to real-world LAN operation scenarios. The algorithm considers user context, communication protocol, and trust level associated with each node, allowing not only the identification of threats but also the formulation of appropriate recommendations for their mitigation (for example, the implementation of authentication, encryption, access auditing, and so forth).

Conclusions. The article presents the results of developing a STRIDE-based adaptive threat-modelling method for the cybersecurity of local computer networks. Specifically, the study identifies typical LAN components and data flows; applies STRIDE to the trust model;

develops an approach for identifying and mitigating threats; and evaluates the effectiveness of the generalised (adaptive) STRIDE-based method for LAN cybersecurity threat modelling. Thus, the research objectives have been achieved, confirming the effectiveness of a systematic approach to identifying and classifying threats within a networked environment while taking into account the specific interactions between its components.

The application of STRIDE to the trust model enabled the systematisation of threats across the categories of Spoofing, Tampering, Repudiation, Information Disclosure, Denial of Service and Elevation of Privilege. This approach made it possible to identify potential vulnerabilities in each direction of data exchange and for every object within the model.

The effectiveness of the proposed method was assessed through expert evaluation using a hypothetical corporate LAN. The results demonstrated that the model is capable of identifying most common threats that are often overlooked in traditional security assessments. The structured and adaptive nature of the algorithm confirms its practical applicability.

Thus, the findings of this study indicate the feasibility and value of using STRIDE as a tool for developing LAN protection models. Future research may focus on automating the modelling process and developing software tools for integrating STRIDE into the information security policies of organisations, institutions and enterprises. Furthermore, practical results from studies [11, 12] suggest the potential for exploring the integration of artificial intelligence capabilities into the proposed method, which may significantly enhance the cybersecurity of LAN environments.

List of References

1. Shostack, A. Threat Modeling: Designing for Security. Wiley, Hoboken. *Scientific research*: URL: www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3746452 (дата звернення: 22.06.2025).
2. OWASP. *Application Threat Modeling*: Веб сайт. URL: www.owasp.org/index.php/Threat_Risk_Modeling (дата звернення: 22.06.2025).
3. Khalil S. M., Bahsi H., Dola H., Korötko T., McLaughlin K., Kotkas V. Threat Modeling of Cyber-Physical Systems: A Case Study of a Microgrid System. *Computers & Security*. Vol. 124, 2023. Pp. 102950.
4. Khan S. A. A STRIDE Model based Threat Modelling using Unified and-Or Fuzzy Operator for Computer Network Security. *International Journal of Computing and Network Technology*. Vol. 5, 1, 2017. Pp. 13-20.
5. Доренський О.П., Улічев О.С., Задорожний К.О., Коваленко А.С., Дресва Г.М. Концептуальна модель системи інформаційного протидіювання координаційного центру з питань національної безпеки і оборони. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41). Ч. 2. С. 23-31. [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).
6. Agile Modeling. *Security Threat Models: An Agile Introduction*: Веб сайт. URL: <http://www.agilemodeling.com/artifacts/securityThreatModel.htm> (дата звернення: 22.06.2025).
7. Kizza, J. M. Guide to Computer Network Security. Springer 2019.
8. Гапон А.О., Федорченко В.М., Поляков А.О. Підходи до побудови моделі загроз для аналізу безпеки відкритого програмного кода. *Системи обробки інформації*. 2020. Вип. 1. С. 128-135. DOI: 10.30748/soi.2020.160.17.
9. Полотай О.І., Пузир А.О. Аналіз та впровадження засобів запобігання витоків конфіденційної інформації на підприємствах, на прикладі системи DLP. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 30. С. 134-144. DOI: 10.32447/20784643.30.2024.13.
10. Полотай О.І., Фединець Н.І., Кухарська Н.П. Дослідження загроз інформаційної безпеки та способів їх вирішення в комп'ютерних мережах на каналному рівні. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 29. С. 65-71. DOI: 10.32447/20784643.29.2024.07.
11. Шелехов І.В., Прилепа Д.В., Хібовська Ю.О., Шамошнін 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. С. 58-72. DOI: [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).
12. 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. Shostack, A. (2014). Threat Modeling: Designing for Security. Wiley, Hoboken. Scientific research: URL: www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3746452 (accessed: 22.06.2025).
2. OWASP. Application Threat Modeling: Beб caйт. URL: www.owasp.org/index.php/Threat_Risk_Modeling (accessed: 22.06.2025).
3. Khalil, S. M., Bahsi, H., Dola, H., Korötko, T., McLaughlin, K., & Kotkas, V. (2023). Threat Modeling of Cyber Physical Systems: A Case Study of a Microgrid System. *Computers & Security*, 124, 102950.
4. Khan, S. A. (2017). A STRIDE Model based Threat Modelling using Unified and Or Fuzzy Operator for Computer Network Security. *International Journal of Computing and Network Technology*, 5(1), 13–20.
5. Dorenskyi, O. P., Ulichev, O. S., Zadorozhnyi, K. O., Kovalenko, A. S., & Drieieva, H. M. (2024). Conceptual model of the system of information confrontation of the coordination center for national security and defence. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41) II, 23–31. [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) [in Ukrainian].
6. Agile Modeling. Security Threat Models: An Agile Introduction: Beб caйт. URL: <http://www.agilemodeling.com/artifacts/securityThreatModel.htm> (accessed: 22.06.2025).
7. Kizza, J. M. (2019). Guide to Computer Network Security. Springer.
8. Hapon, A. O., Fedorchenko, V. M., & Polyakov, A. O. (2020). Approaches to building a threat model for open source code security analysis. *Systemy obrobky informatsii*, 1, 128–135. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.160.17> [in Ukrainian].
9. Polotai, O. I., & Puzyr, A. O. (2024). Analysis and implementation of DLP systems to prevent confidential data leakage at enterprises. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiedialnosti*, 30, 134–144. <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.13> [in Ukrainian].
10. Polotai, O. I., Fedynets, N. I., & Kukharska, N. P. (2024). Research of cybersecurity threats and ways to counter them at the data-link layer of computer networks. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiedialnosti*, 29, 65–71. <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.07> [in Ukrainian].
11. Shelekhov, I. V., Prylepa, D. V., Khibovska, Yu. O., Shamoin, K. Ye., & Dorenskyi, O. P. (2025). Information-extreme technology for intelligent analysis of educational content quality in universities. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 12(43) I, 58–72. [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) [in Ukrainian].
12. Korniienko, O., Kozub, N., & Dorenskyi, O. (2025). Method and technological solution of an AI-based adaptive investor survey service for determining individual risk profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42) 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).

О. І. Полотай¹, доц., канд. техн. наук, **О. П. Доренський**², доц., канд. техн. наук, **А. С. Коваленко**², **К. О. Буравченко**², доц., канд. техн. наук

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна,

STRIDE-модельовання загроз кібербезпеці локальних комп'ютерних мереж

Праця присвячена проблемі забезпечення кібербезпеки LAN в умовах зростання кількості та складності загроз, для вирішення якої сформувано узагальнений адаптивний спосіб модельовання загроз LAN на основі STRIDE. За результатами дослідження визначено наявний розрив між теоретичними моделями загроз і їх практичною реалізацією у контексті локальних комп'ютерних мереж. На основі побудови моделі DFD сформовано структуроване представлення типових компонент LAN, зовнішні сутності, мережеві процеси та потоки даних. До кожного елементу моделі застосовано класифікацію загроз STRIDE, що дозволило систематизувати потенційні ризики, сформувати матрицю загроз для подальшого аналізу.

Адаптивний метод модельовання загроз включає процеси аналізу архітектури мережі, автоматизованого формування переліку загроз, вибору релевантних контрзаходів, модельовання захищеної мережі, верифікації в симуляційному середовищі. Оцінювання його ефективності здійснено за критеріями повноти покриття загроз, адаптивності, практичності впровадження та можливості автоматизації.

Результати дослідження показали, що застосування STRIDE у поєднанні з DFD-модельованням дозволяє підвищити рівень структурованості аналізу кіберзагроз, реалізувати системний підхід до формування моделі захисту локальної мережі. Це дає можливість ідентифікувати потенційні вразливості, які часто залишаються поза увагою при традиційних підходах. Перспективами подальших розвідок є розроблення програмних засобів для автоматизації STRIDE-модельовання та інтеграція інструментів штучного інтелекту для підвищення ефективності захисту LAN.

кібербезпека, локальна мережа, STRIDE, модельовання загроз, захист мережі, вразливість, аналіз ризиків

Одержано (Received) 09.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 01.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.82

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.69-78](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.69-78)**І. Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **Р. М. Рогатинський**, проф., д-р техн. наук,**О. Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук, **М. І. Пилипець**, проф., д-р техн. наук,**І. Г. Ткаченко**, 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*

Технологічне проектування способів навівання широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою

Дослідження присвячено технологічному проектуванню способів навівання широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою. У статті обґрунтовано схеми двох типів виготовлення широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою. Зокрема без калібрування на етапі навівання та з операцією калібрування при навіванні. Висота отриманих широкосмугових гвинтових спіралей в значній мірі залежить від попередньої підготовки смуги. Вона передбачає виконання додаткових операцій перед навіванням, таких як вирубування або вирізання трикутних чи трапецієдальних сегментів на смуговій заготовці. Тому, при забезпеченні таких варіантів способу отримання широкосмугових гвинтових спіралей, їхня висота відповідно зростатиме у порівнянні із класичними аналогами. Для обох типів обґрунтованих способів навівання широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою визначено і представлено базові конструктивно-технологічні параметри процесу їх виготовлення. Також в роботі значна увага приділена аналізу конструкційних матеріалів та інструментарію, які використовуються при виготовленні широкосмугових гвинтових спіралей.

технологічне проектування, спосіб, гвинтова спіраль, широкосмугові, обертова втулка, навівання, операція

Постановка проблеми. Технологічне проектування окремих способів навівання широкосмугових гвинтових спіралей характеризується цілим рядом конструкторських, технологічних і виробничих проблем, які вимагають системного осмислення та ефективного вирішення у кожному окремому випадку. До рішень, пов'язаних із вирішенням проблем в процесі виготовлення широкосмугових гвинтових спіралей, відносять пошук можливих рішень зниження енерговитрат, скорочення кількості операцій і зменшення їх тривалості, пошук оригінальних способів їх виготовлення та прорахунок і відбір найраціональніших, мінімізація витрат на оснастку, ефективний вибір матеріалів в залежності від висунутих конструктивних вимог та умов експлуатації. Також важливим фактором при виготовленні широкосмугових гвинтових спіралей, особливо в одиничному та дрібносерійному виробництві, є забезпечення необхідної точності параметрів їх геометричних поверхонь, позаяк ці поверхні мають досить складну просторову форму, а це використання спеціалізованого високоточного оснащення та інструменту. Ще однією важливою проблемою при виготовленні широкосмугових гвинтових спіралей є забезпечення їх відповідних механічних властивостей, таких як зносостійкість, міцність, втомна витривалість. Це інколи вимагає використання в технологічному процесі додаткових технологічних операцій, таких як поверхневе зміцнення зовнішнього контуру спіралі, термічна обробка спіралі тощо. Відтак, одержання широкосмугових гвинтових спіралей потребує технологічного проектування ефективних способів їх виготовлення, які можуть забезпечити отримання цих спіралей з потрібними характеристиками за мінімальних часових, енергетичних та інших витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічному проектуванню та дослідженню різноманітних способів виготовлення різнопрофільних гвинтових спіралей присвячені здобутки значної кількості вітчизняних та закордонних учених. Значний вклад у технологічне проектування та розроблення і вивчення різнотипових технологій отримання шнеків зробили Б.М. Гевко [1, 2], М.І. Пилипець [3, 4], В.В. Васильків [3-6], А.Є. Дячун [7-14] та багато інших дослідників [15-21]. У їхніх працях викладено оригінальні підходи з одержання гвинтових спіралей різного профілю. Проведено дослідження різних способів навивання і прокатування, штампування та пресування, вирізання і складання окремих елементів у гвинтові поверхні тощо. Чільна увага ними була сконцентрована на конструюванні та забезпеченні технологічності конструкцій спеціалізованого технологічного інструментарію. Значна кількість останніх досліджень, яка пов'язана із отриманням гвинтових заготовок, присвячена технологічному проектуванню різнопрофільних гвинтових спіралей [1, 2, 6-17, 19-21].

Постановка завдання. Метою роботи є технологічне проектування способів навивання ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою.

Виклад основного матеріалу. Ширококутові гвинтові спіралі застосовуються в багатьох галузях промисловості передусім завдяки своїм основним функціональним властивостям: високій продуктивності, здатності транспортувати або перемішувати матеріали, стійкості до зношування. Основні сфери використання механізмів із ширококутовими гвинтовими спіралями:

- харчова промисловість, а саме транспортування сипучих продуктів, перемішування компонентів та їх виробництво (сухі суміші, добавки). Для таких процесів важливим є те, що широкий виток забезпечує м'яке переміщення і більшу пропускну здатність механізмів;

- будівельна галузь – це подача цементу, піску, щебеню, гіпсу у змішувачі або бетонні міксери, використання у шнекових дозаторах. Широке застосування зумовлене здатністю спіралей витримувати великі абразивні навантаження;

- аграрний сектор застосовує ширококутові гвинтові спіралі для транспортування зерна, комбікорму, насіння. А також для використання у шнекових елеваторах, завантажувачах, бункерах. Основною експлуатаційною функцією є рівномірна подача сипучих матеріалів на значні відстані;

- хімічна та фармацевтична промисловість використовують такі спіралі завдяки можливості їх виготовлення з нержавіючої сталі, яка не вступає в реакцію з агресивними речовинами, відповідно для транспортування порошків, гранулятів, хімічних компонентів, використання у змішувачах та реакторах для перемішування реагентів;

- машинобудування та енергетика передбачають застосування гвинтових спіралей у системах видалення і транспортування стружки, щепи, пластикових гранул тощо. А також це частина живильників, завантажувальних пристроїв, дозаторів, систем охолодження або нагрівання матеріалу під час транспортування.

Класичні способи навивання гвинтових спіралей передбачають їх формоутворення навиванням смуги на різні види оправ шляхом її підтискання формоутворюючими роликами [3-6, 14]. Проте для виготовлення ширококутових гвинтових спіралей більш ефективними є способи їх отримання з допомогою обертової втулки [9, 17, 22-26]. Ці способи передбачають проведення процесу формоутворення із обтиском заготовки по зовнішньому контуру із затиском бокових поверхонь. При цьому внутрішня поверхня гвинтової заготовки, як правило, є не залученою до процесу формоутворення і не контактує з оправкою, формоутворюючих роликів чи обертової

втулки. Це дозволяє забезпечувати значну висоту навивної стрічки і отримання ширококутових гвинтових спіралей. Такі способи реалізуються із використанням обертової втулки і є двох видів: без калібрування на етапі навивання [22-24] і з калібрування на етапі навивання [25, 26]. Розглянемо їх детальніше.

Схеми реалізації способу навивання ширококутових гвинтових спіралей із використанням обертової втулки без калібрування при навиванні представлено на рис. 1.

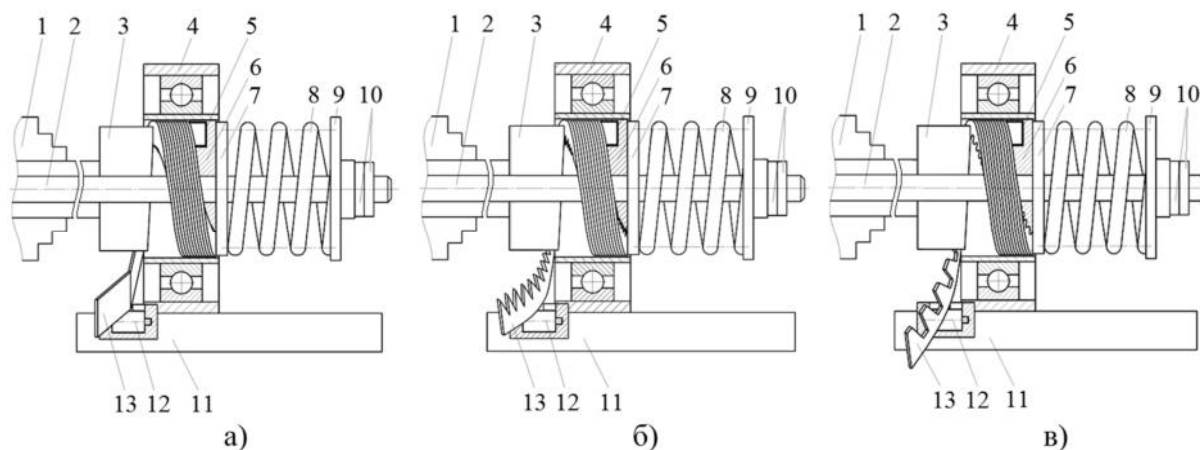


Рисунок 1 – Схеми виготовлення ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою без калібрування на етапі навивання:

а – пат. України № 127385; б – пат. України № 127577; в – пат. України № 127985;

1 – патрон токарного верстата; 2 – оправка; 3 – ліва коса втулка; 4 – обертова втулка; 5 – паз;

6 – права коса втулка; 7 – шайба; 8 – пружина; 9 – упорна шайба; 10 – гайка;

11 – супорт токарного верстата; 12 – напрямний ролик; 13 – смуга

Джерело: розроблено авторами

Реалізація способу навивання ширококутових гвинтових спіралей із використанням обертової втулки без калібрування на етапі навивання (рис. 1) може проводитись без попередньої підготовки смуги (рис. 1.а) та з її попередньою підготовкою (рис. 1.б і рис. 1.в), що передбачає виконання додаткових операцій перед навиванням, таких як вирубування або вирізання трикутних (рис. 1.б) чи трапецеїдальних (рис. 1.в) сегментів на смуговій заготовці 13. Відповідно при забезпеченні таких варіантів способу отримання ширококутових гвинтових спіралей їхня висота значно зростатиме у порівнянні із класичними аналогами. Відтак порівняно найменшу висоту ширококутової гвинтової спіралі можна отримати реалізуючи схему виготовлення ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою без калібрування на етапі навивання зображену на рис. 1.а, а найбільшу, при реалізації схеми зображеної на рис. 1.в.

Спосіб передбачає використання пристрою для навивання ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою. Пристрій містить оправку 2, на якій з лівої сторони (рис. 1) розташована ліва коса втулка 3, а з правої – права коса втулка 6. Причому права коса втулка 6 має обмежену можливість осьового зміщення по оправці 2 в процесі навивання, тому, що її права торцева поверхня шайби 7 контактує з пружиною 8, величина затиску і зміщення якої через упорну шайбу 9 регулюється і обмежується гайками 10. А на лівій торцевій поверхні косої втулки 6 виконано паз 5 для кріплення Г-подібного кінця смуги 13. Ліва коса втулка 3 з лівої сторони виконана меншого діаметру, по якому здійснюється її затиск в патроні 1 токарного верстату. З лівої сторони оправка 2 закріплена у пневмоциліндрі (на рисунку не показаний) і має здатність до колового провертання та осьового зміщення після включення пневмоциліндра після завершення процесу навивання. Крім того, пристрій містить

обертову втулку 4, яка закріплена у супорті токарного верстату 11. У ній частково правою стороною розташована ліва коса втулка 3 і повністю розташована права коса втулка 6. У нижній частині обертової втулки 4 розташовано з можливістю колового обертання напрямний ролик 12.

Спосіб навівання ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою реалізується наступним чином. Перед початком процесу навівання ліву косу втулку 3 закріплюють патроні 1 токарного верстату, оправку 2 з лівої сторони закріплюють у пневмоциліндрі, а обертову втулку 4 в супорті токарного верстату 11. Далі смугу 13 вводять між лівою 3 та правою 6 косими втулками і її Г-подібний кінець закріплюють у пазу 5, що виконаний на лівій торцевій поверхні косої втулки 6, а також смугу 13 по зовнішній торцевій поверхні розміщують у напрямному ролику 12, який розташовано з можливістю колового обертання у нижній частині обертової втулки 4 і закріплено в супорті токарного верстата 11.

Після завершення кріпильних та установчих операцій вмикають привід токарного верстату, що призводить до колового обертання оправки 2 з лівою 3 та правою 6 косими втулками. Це, у свою чергу, забезпечує реалізацію процесу навівання ширококутової гвинтової спіралі зі смуги 13 обертовою втулкою 4. Під час цього процесу права коса втулка 6 постійно відтискається знову навитими витками в осьовому напрямку вправо, що призводить до стиснення пружини 8.

По завершенню навівання усього відрізка смуги 13 у ширококутову гвинтову спіраль процес навівання закінчується і проводять вимикання приводу токарного верстату. Далі вмикають пневмоциліндр (на рисунку не показаний) і проходить зміщення оправки 2 в осьовому напрямку вправо. При цьому ліва коса втулка 3 залишається закріплена в патроні 1 токарного верстата. Це, у свою чергу, призводить до послаблення пружини 8 і можливості відгвинчування гайок 10 та зняття з оправки 2 упорної шайби 9, пружини 8, шайби 7, правої косої втулки 6 та навитої зі смуги 13 ширококутової гвинтової спіралі.

Після завершення операції навівання відомим способом виконують операцію калібрування ширококутової гвинтової спіралі на потрібний крок.

Базові конструктивно-технологічні параметри розробленого способу виготовлення ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою без калібрування на етапі навівання [22-24] представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Базові конструктивно-технологічні параметри процесу виготовлення ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою без калібрування на етапі навівання

№	Частота обертання, оправки, об/хв.	Висота спіралі, мм	Зовнішній діаметр спіралі, мм	Товщина заготовки, мм	Площа вилучень зі спіралі, %
1	10...30	30...80	100...500	0,8...2,5	0
2	10...25	40...100	120...500	0,8...2,5	$0 \geq 10$
3	7,5...20	50...120	150...500	0,8...3,0	$10 \geq 20$
4	6...20	60...150	180...500	1...3,0	$20 \geq 30$
5	5...20	70...200	200...500	1...3,0	$30 \geq 40$

Джерело: розроблено авторами

Типові схеми реалізації способу навівання із використанням обертової втулки з одночасним калібруванням на етапі навівання представлено на рис. 2.

Спосіб навівання ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою з одночасним калібруванням на етапі навівання передбачає використання пристрою для навівання ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою з одночасним калібруванням на етапі навівання (рис. 2). Пристрій включає оправку 1, на зовнішній поверхні якої жорстко закріплено калібрувальну гвинтову спіраль 2, і яку жорстко закріплено з можливістю обертання в привідному центрі та обертовій опорі (на схемі не показано). В правій частині оправки 1 у крайньому правому положенні на торцевій поверхні калібрувальної гвинтової спіралі 2 виконано механізм кріплення 3 смуги 7 (заготовки). У направляючих 5, які розміщено паралельно до оправки 1, з можливістю примусового зворотно-поступального руху встановлено пересувну втулку 4. Пересувна втулка 4 у лівій частині оснащена установчим пазом 6 для розміщення та направлення смуги 7, над яким закріплено направляючий ролик 8. Також, у внутрішньому просторі пересувної втулки 4 в підшипниковій опорі 9 жорстко встановлено обертову втулку 10.

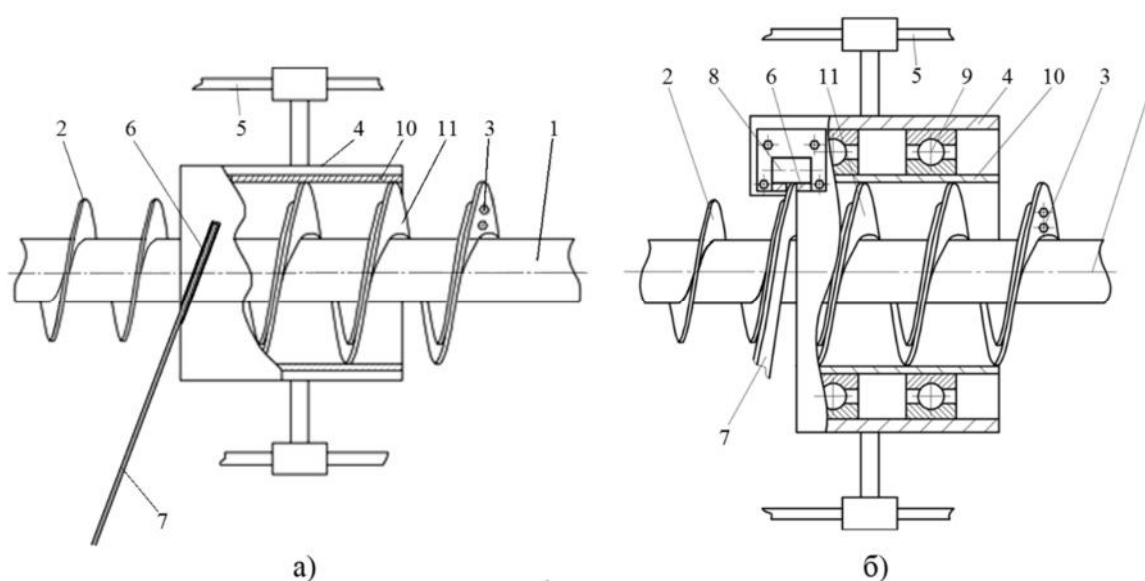


Рисунок 2 – Схеми виготовлення ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою з одночасним калібруванням на етапі навівання:

а – пат. України № 104783; б – пат. України № 127375; 1 – оправка;

2 – калібрувальна гвинтова спіраль; 3 – механізм кріплення смуги; 4 – пересувна втулка;

5 – направляючі; 6 – установчий паз; 7 – смуга; 8 – направляючий ролик; 9 – підшипникова опора;

10 – обертова втулка; 11 – ширококутова гвинтова спіраль

Джерело: розроблено авторами

Спосіб навівання ширококутових гвинтових спіралей обертовою втулкою з одночасним калібруванням на етапі навівання реалізується наступним чином. Перед проведенням процесу навівання пересувна втулка 4 по направляючих 5 відводиться у крайнє праве положення, а смугу 7 закріплюють в механізмі кріплення 3 на торцевій поверхні калібрувальної гвинтової спіралі 2 оправки 1. На наступному етапі пересувну втулку 4 переміщують у лівий бік до введення смуги 7 в установчий паз 6 з направляючим роликом 8.

Після завершення кріпильних та установчих операцій вмикають привідний центр (наприклад, патрон токарного верстату), що забезпечує обертання оправки 1 з калібрувальною гвинтовою спіраллю 2, та процес формоутворення ширококутової гвинтової спіралі із закріпленої на ній смуги 7, шляхом її загинання обертовою втулкою 10 із притисканням до калібрувальної гвинтової спіралі 2. При цьому крок

формоутвореної широкосмугової гвинтової спіралі 11 відповідає кроку калібрувальної гвинтової спіралі 2, а пересувна втулка 4 здійснює примусовий зворотно-поступальний рух під дією прикладених до неї сил (наприклад, рухом супорту токарного верстату) вліво із швидкістю, яка відповідає кроку калібрувальної гвинтової спіралі 2.

По завершенню навивання усього відрізка смуги 7 у широкосмугову гвинтову спіраль 11 процес навивання закінчується і проводять зупинку обертового руху привідного центру та зворотно-поступального руху пересувної втулки 4. Далі оправку 1 знімають з привідного центра та обертової опори, навиту широкосмугову гвинтову спіраль відкріплюють з механізму кріплення 3 і проводять її згвинчування з оправки 1.

Базові конструктивно-технологічні параметри розробленого способу виготовлення широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою з одночасним калібруванням на етапі навивання [25, 26] представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Базові конструктивно-технологічні параметри процесу виготовлення широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою з одночасним калібруванням на етапі навивання

№	Частота обертання, оправки, об/хв.	Висота спіралі, мм	Зовнішній діаметр спіралі, мм	Товщина заготовки, мм	Крок спіралі, мм	Повздовжня подача пересувної втулки, мм/об.
1	10...30	30...80	100...500	0,8...2,5	80...550	80...550
2	10...25	40...100	120...500	0,8...2,5	100...550	100...550
3	7,5...20	50...120	150...500	0,8...3,0	120...550	120...550
4	6...20	60...150	180...500	1...3,0	150...550	150...550
5	5...20	70...200	200...500	1...3,0	180...550	180...550

Джерело: розроблено авторами

Навивання широкосмугових шнеків – це складний технологічний процес, який включає формування спіралі з плоскої металевої смуги з метою отримання гвинтової заготовки з заданими геометричними параметрами. Початковим етапом є підбір та нарізання металевої смуги (зазвичай із холоднокатаного прокату) відповідної товщини (наприклад, 1,5–4 мм) і ширини. Смуги можуть подаватися з рулону або бути мірного відрізу. Оптимальним варіантом є використання холоднокатаного металопрокату у формі смуг відповідно до вимог ДСТУ EN 10139:2019. У нашій практиці доцільно використовувати значення товщин 1,5; 2,5; 3,5 та 4 мм. Щодо ширини, стандарт згідно з ДСТУ EN 10139:2019 передбачає типорозміри 250, 400, 500 та 600 мм. Якщо виникає потреба у використанні смуг нетипових розмірів, варто звернути увагу на листовий прокат, який можна розкрити до необхідної ширини за допомогою штампів, гільйотинних ножиць або прокатного обладнання. Рекомендовані значення товщин листів із стандартного асортименту включають: від 1,2 до 1,5 мм із послідовним збільшенням кроку 0,1 мм; від 1,6 до 3,3 мм з кроком 0,2 мм; від 3,8 до 4,0 з кроком 0,1 мм.

Для зменшення деформаційних зусиль, під час формування широкосмугових спіралей, застосовують відповідні мастильні матеріали – індустріальні або силіконові. Використання мастил також дозволяє запобігти явищам схоплювання, утворенню задирок, заїданню та налипанню металу під час процесів пластичного деформування. Їх застосування регламентується положеннями стандартів ДСТУ 4310:2004 (ISO 6743-7:86). Індустріальні мастила марок И-20... И-50 є економічно вигідним варіантом,

однак синтетичні силіконові мастила з низькою в'язкістю демонструють вищу проникаючу здатність. Вони мають гарну плинність і рівномірно покривають поверхню металу. Такі матеріали добре витримують значні механічні навантаження та залишаються стабільними при дії як високих, так і низьких температур. Крім того, вони відзначаються високою водостійкістю і практично не змиваються більшістю звичайних розчинників. Серед рекомендованих марок – ПМС-20, ПМС-50.

Враховуючи різноманіття розмірів, то доцільним обладнанням для формування вихідних заготовок при формуванні широкосмугових спіралей, а саме смуг з необхідними конструктивними параметрами, є гільйотинні ножиці, зокрема:

- механічні гільйотини (для тонколистового металу, до 3–4 мм), мод. Н3121, НГ5222, НД3318, НД3320;

- гідравлічні гільйотини (для більш товстих листів, 4...10 мм і більше). Вони забезпечують дуже чистий та рівний різ, можливість обробки великоформатних листів, плавне регулювання кута та сили різку стабільні та точні. Типові моделі – QC12Y, Baykal HGL, Durma VS Series;

- NC/CNC гільйотини (з напівавтоматичним керуванням і, відповідно, ЧПК з можливістю імпорту креслень заготовок з CAD/CAM систем) – це сучасні високоточні гідравлічні ножиці для серійної нарізки із заданими параметрами. Переваги: автоматизація різку, можливість програмувати довжину, кількість смуг, позиціонування, економія часу та матеріалу. Застосування: масове виробництво гвинтових смуг із металу стандартної та змінної ширини. Типові моделі – Ermaksan CNC HVR, ADIRA GH CNC, Durma CNC HGS.

Для промислового виробництва краще застосовувати дискові ножиці або ж дискові розмотувально-різальні лінії (сліттери). Вони мають наступні переваги: висока швидкість (до 120 м/хв.); точне різання одразу кількох смуг; автоматична синхронізація; мінімальні втрати матеріалу. Типові моделі – ZJX Series (Китай), Arku Slitting Line (Німеччина), FIMI Slitter Metallkraft, Dimeco, Wuxi (Італія).

Застосування вищевказаного обладнання в контексті виробництва широкосмугових гвинтових заготовок спіралей полягає у тому, що після розкрою листового металу на смуги потрібної ширини (125-600 мм) ці смуги подаються на навивальні установки або пресове обладнання для формування гвинтових спіралей; відповідно якісно розрізані смуги забезпечують рівномірну деформацію, відсутність перекосів, надійне формування витків під час навивання.

Висновки. Проведено технологічне проєктування способів навивання широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою. Обґрунтовано схеми виготовлення широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою без калібрування на етапі навивання, та з операцією калібрування з використанням обертової втулки. Реалізація цих способів навивання широкосмугових гвинтових спіралей із використанням обертової втулки може проводитись без попередньої підготовки смуги та з її попередньою підготовкою. Ця підготовка передбачає виконання додаткових операцій перед навиванням, таких як вирубування або вирізання трикутних чи трапецеїдальних сегментів на смуговій заготовці. Відповідно при забезпеченні таких варіантів способу отримання широкосмугових гвинтових спіралей їхня висота значно зростатиме у порівнянні із класичними аналогами. Для обох типів представлених способів навивання широкосмугових гвинтових спіралей обертовою втулкою визначено і представлено базові конструктивно-технологічні параметри процесу їх виготовлення. Також в роботі проведено аналіз конструкційних матеріалів та інструментарію, що використовуються при виготовленні широкосмугових гвинтових спіралей.

Список літератури

1. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок деталей машин. Тернопіль : Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с. ISBN 966-305-014-4.
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 імені Івана 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., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil : 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*. Polytechnic University of Bucharest, 2016. Vol. 49, № 2. P. 77–82.
8. Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference DSMIE-2021*. Lviv, 2021. Vol. 1. P. 385–394.
9. Oleg Lyashuk, Roman Rogatynskyi, Ivan Hevko, Tetiana Navrotska, Andrii Diachun. Study of power parameters of the screw spirals forming. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024*. Pilsen, Czech Republic, 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., Третьяков 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. та ін. Перспективні гвинтові конвеєри : монографія. 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. Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval. Peculiarities of technological design of U-shaped screw working bodies. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil : TNTU, 2024. Vol. 113, № 1. P. 5–15.
16. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of manufacturing method choice for screw elements. *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. та ін. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування та 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. та ін. Особливості конструкцій і проектування 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. та ін. Технологічне проектування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 109–116.
21. Гевко І. Б., Стібайло О. Ю., Лещук Р. Я. та ін. Техніко-економічне обґрунтування виготовлення шнекових спіралей. *Перспективні технології та прилади*. 2025. Вип. 26. С. 29–37.
22. Патент №127385 Україна. Пристрій для навівання гвинтових спіралей / Гевко І. Б. та ін. №u201802507; заявл. 12.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14.
23. Патент №127577 Україна. Пристрій для навівання широкосмугових спіралей / Гевко І. Б. та ін. №u201802465; заявл. 12.03.2018; опубл. 10.08.2018, Бюл. №15.

24. Патент №127985 Україна. Пристрій для навивання спіралей з профільною поверхнею / Гевко І. Б. та ін. №u201803420; заявл. 02.04.2018; опубл. 27.08.2018, Бюл. №16.
25. Патент №104783 Україна. Пристрій для навивання спіралей / Гевко Б. М. та ін. №u201503707; заявл. 20.04.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл. №4.
26. Патент №127375 Україна. Пристрій для навивання гвинтових спіралей / Гевко І. Б. та ін. №u201802467; заявл. 12.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14.

References

1. Hevko, B. M., Pylypets, M. I., Vasylykiv, V. V., & Radyk, D. L. (2009). Technological fundamentals of shaping of multi-profile screw blanks of machine parts. Ternopil: Vyd-vo TDTU im. I. Puliuiia. ISBN 966-305-014-4 [in Ukrainian].
2. Hevko, B. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Drahan, A. P., & Novosad, I. Ya. (2008). Technological fundamentals of shaping of special profile screw parts. Ternopil: TDTU imeni Ivana Puliuiia [in Ukrainian].
3. Pylypets, M. I., Vasylykiv, V. V., Radyk, D. L., & Pylypets, O. M. (2021). Preconditions for the development of combined operations for manufacturing screw and auger blanks by metal forming. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, 18, 112–123 [in Ukrainian].
4. Vasylykiv, 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. Vasylykiv, V. V. (2015). Development of scientific and applied foundations for the development of technologies for the production of screw and auger blanks using unification (Extended abstract of Doctoral dissertation). Lviv [in Ukrainian].
6. Vasylykiv, V. V., Radyk, L. D., & Hevko, I. B. (2004). 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, Y., & Hupka, A. (2021). Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference DSMIE-2021*, 1, 385–394.
9. Lyashuk, O., Rohatynskyy, R., Hevko, I., Navrotska, T., & Diachun, A. (2024). Study of power parameters of the screw spirals forming. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024*, 1, 287–298.
10. Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Hupka, A. B. (2025). Technological features of manufacturing shredding knives on auger spirals. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/1), 75–83 [in Ukrainian].
11. Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Zoloty, R. Z. (2025). Research of operations of the technological process of manufacturing shredding knives on auger spirals. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 99–108 [in Ukrainian].
12. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). Technological design and manufacturing of screw transport-technological working bodies. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
13. Rohatynskyy, R. M., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., et al. (2019). Perspective screw conveyors: monograph. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Rohatynskyy, R. M., Hevko, I. B., Diachun, A. Ye. (2014). Scientific and applied foundations of creation of screw transport-technological mechanisms: monograph. Ternopil: TNTU im. I. Puliuiia [in Ukrainian].
15. Hevko, I., Pik, A., Komar, R., Stibaylo, O., & Koval, S. (2024). Peculiarities of technological design of U-shaped screw 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 manufacturing method choice for screw elements. *Acta Technologica Agriculturae*, 2, 36–41. doi.org/10.1515/ata-2017-0007.
17. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., et al. (2019). Flexible screw conveyors: design and research. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
18. Hevko, I. B. (2011). Modeling of load character on screw working bodies. *Visnyk TNTU*, 16(1), 69–77 [in Ukrainian].
19. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., et al. (2023). Features of designs and design of blade screw mixers. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39/2), 24–34 [in Ukrainian].
20. Hevko, I. B., Rohatynskyy, R. M., Komar, R. V., et al. (2025). Technological design of manufacturing methods for U-shaped screw surfaces. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 109–116 [in Ukrainian].
21. Hevko, I. B., Stibailo, O. Yu., Leshchuk, R. Ya., et al. (2025). Technical and economic justification for manufacturing auger spirals. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, 26, 29–37 [in Ukrainian].
22. Hevko, I. B., et al. (2018). Device for winding screw spirals (UA Patent No. 127385). Biul. No. 14 [in Ukrainian].

23. Hevko, I. B., et al. (2018). Device for winding wide-band spirals (UA Patent No. 127577). Biul. No. 15 [in Ukrainian].
24. Hevko, I. B., et al. (2018). Device for winding spirals with a profile surface (UA Patent No. 127985). Biul. No. 16 [in Ukrainian].
25. Hevko, B. M., et al. (2016). Device for winding spirals (UA Patent No. 104783). Biul. No. 4 [in Ukrainian].
26. Hevko, I. B., et al. (2018). Device for winding screw spirals (UA Patent No. 127375). Biul. No. 14 [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Roman Rohatynskyi**, Prof., DSc., **Oleg Lyashuk**, Prof., DSc.,
Mykhailo Pylypets, Prof., DSc., **Igor Tkachenko**, Assoc. Prof., PhD, **Roman Komar**, Assoc. Prof., PhD
Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Technological Design of Methods for Winding Broadband Helical Coils With a Rotating Sleeve

The technological design of individual methods of winding broadband helical spirals is characterized by a number of design, technological and production problems that require systematic understanding and effective solutions in each individual case. Solutions related to solving problems in the process of manufacturing broadband helical coils include finding possible solutions to reduce energy consumption, reducing the number of operations and reducing their duration, finding original methods of their manufacture, and calculating and selecting the most rational ones, minimizing tooling costs, effective selection of materials depending on the design requirements and operating conditions. Also, an important factor in the manufacture of broadband helical spirals, especially in single and small-scale production, is ensuring the necessary accuracy of the parameters of their geometric surfaces, since these surfaces have a rather complex spatial shape, and this requires the use of specialized high-precision equipment and tools.

Another important problem in the manufacture of broadband helical spirals is ensuring their appropriate mechanical properties, such as wear resistance, strength, fatigue endurance. This sometimes requires the use of additional technological operations in the technological process, such as surface hardening of the outer contour of the spiral, heat treatment of the spiral, etc. Therefore, obtaining broadband helical spirals requires technological design of effective methods of their manufacture, which can ensure the production of these spirals with the required characteristics at minimal time, energy and other costs.

The research is devoted to the technological design of methods for winding broadband helical spirals with a rotating sleeve. Broadband helical spirals are used in many technical systems to perform various technological operations. Classical methods of winding helical spirals involve forming them by winding the strip onto various types of frames by pressing it with forming rollers. However, for the production of wide-band helical spirals, methods of obtaining them using a rotating sleeve are more effective. These methods involve the forming process with the pressing of the workpiece along the outer contour with the clamping of the side surfaces. In this case, the inner surface of the screw workpiece, as a rule, is not involved in the forming process and does not touch the mandrel, forming rollers or rotating sleeve. This allows for a significant height of the winding tape and the production of wide-band helical spirals. Such methods are implemented using a rotating sleeve and are of two types: without calibration at the winding stage and with calibration at the winding stage.

These methods of winding wide-band helical coils using a rotating sleeve can be implemented without or with strip pre-preparation. This preparation involves performing additional operations before winding, such as cutting out or cutting triangular or trapezoidal segments on the strip blank. Accordingly, when providing such variants of the method of obtaining broadband helical spirals, their height will increase significantly compared to classical analogues.

For both types of substantiated methods of winding broadband helical spirals with a rotating sleeve, the basic design and technological parameters of their manufacturing process are determined and presented. Also, considerable attention is paid in the work to the analysis of structural materials and tools used in the manufacture of broadband helical spirals.

technological design, method, helical spiral, broadband, rotating sleeve, winding, operation

Одержано (Received) 05.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 539.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.79-86](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.79-86)**О. С. Мусієнко, д-р філос., О. В. Білий***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: olga.musinko@gmail.com*

Міцність виробів із PLA залежно від щільності заповнення та орієнтації шарів при FDM-друці

У роботі досліджено вплив щільності заповнення та орієнтації шарів на механічні властивості зразків із PLA, виготовлених методом FDM-друку. Проведено повний факторний експеримент і побудовано регресійну модель, що підтверджує визначальний вплив орієнтації шарів на міцність матеріалу. Встановлено, що правильний вибір комбінації параметрів друку дозволяє досягти оптимального балансу між жорсткістю, пружністю та міцністю. Запропоновано оптимальні параметри друку, які забезпечують економію матеріалу до 25% без суттєвих втрат міцності, що робить результати дослідження корисними для практичного застосування у виробництві функціональних деталей методом адитивного виробництва.

FDM-друк, PLA, міцність, щільність заповнення, орієнтація шарів, регресійна модель

Постановка проблеми. Серед технологій адитивного виробництва найбільш поширеним методом є моделювання наплавленням розплавленого матеріалу (FDM-друк). Попри його широке застосування у виготовленні прототипів та функціональних елементів, механічні характеристики готових виробів значно відрізняються від властивостей базового матеріалу. Однією з основних причин є вплив технологічних параметрів, зокрема ступеня заповнення внутрішньої структури виробу та орієнтації шарів під час друку.

Оптимізація цих параметрів дозволяє покращити міцнісні характеристики при мінімальному використанні матеріалу, що особливо актуально для інженерії, біомеханіки, а також легких конструкцій у машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують, що механічні властивості FDM-виробів суттєво залежать від щільності внутрішнього заповнення, орієнтації шарів та властивостей полімерної матриці [1]. У роботі [2] показали, що для точного опису механічної поведінки PLA необхідні нелінійні моделі матеріалу, чутливі до зміни інфілу. Подібні результати отримали і у роботі [3], які досліджували еластomers з різними схемами заповнення і довели, що відносна щільність визначає робочий діапазон деформацій.

Напрямок модифікації полімерів також активно розвивається. Зокрема, у роботі [4] описали суміші PP/SEBS, що забезпечують кращий баланс міцності та деформаційних характеристик у порівнянні з вихідним поліпропіленом. У роботі [5] показано, що введення натурального каучуку до PLA підвищує ударну в'язкість і придатність матеріалу для FDM-друку, при цьому вибір патерну заповнення істотно впливає на кінцеву поведінку виробів.

Значний інтерес викликає дослідження впливу орієнтації растрових шарів. Автори роботи [6] довели, що статичні та динамічні властивості ABS-пластиків змінюються залежно від растрового кута, що підкреслює анізотропію, властиву шаруватій структурі виробів. Подібні закономірності простежуються і для PLA.

Окремий напрям становить проектування багатоматеріальних структур. Робота [7] показала, що просторове комбінування «жорстких» і «м'яких» фаз дозволяє раціонально керувати пружними властивостями. У роботі [8] досліджено контроль щільності піноподібних

структур шляхом регулювання температури друку, що відкриває нові можливості для створення енергоабсорбуючих елементів. Аналогічно, у роботі [9] описали стадії деформації гнучких матеріалів із різною відносною щільністю, звертаючи увагу на плато колапсу клітинних структур.

Узагальнено вплив параметрів FDM-друку представлено в монографії [10], де систематизовано роль інфілу, орієнтації, температурного режиму та інших параметрів. Таким чином, попередні роботи доводять необхідність комплексного врахування щільності заповнення, орієнтації шарів і властивостей матеріалу для забезпечення прогнозованих механічних характеристик виробів. Саме ці аспекти й визначають актуальність проведеного у даній роботі експериментального дослідження та побудови регресійної моделі.

Постановка завдання. З метою підвищення ефективності FDM-друку актуальним є встановлення залежності між параметрами друку та механічними властивостями виробів. Завданням даної роботи є дослідження впливу щільності заповнення та орієнтації шарів на міцність PLA-зразків, побудова регресійної моделі для прогнозування властивостей, а також визначення оптимальних параметрів друку з урахуванням міцності та економії матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було проведено повний факторний експеримент за схемою $3^2 \times 3 = 27$ (два фактори на трьох рівнях, по три ітерації кожного випробування), де в якості факторів обрано два ключові параметри FDM-друку: щільність заповнення внутрішньої структури зразка та орієнтацію шарів друку (табл. 1).

Таблиця 1 - Фактори та функції ПФЕ

Змінні фактори ПФЕ					Функція відгуку	
Щільність заповнення, x_1			Кут орієнтації друку, x_2			$\hat{y}$
30%	65%	100%	[0]	[45,-45]	[90]	σ_B

Джерело: розроблено авторами

Зразки виготовлялися з полілактиду (PLA), який є одним із найпоширеніших матеріалів для FDM-друку завдяки своїй екологічності, низькій температурі плавлення та задовільним механічним характеристикам.

Для виготовлення використовувались зразки типу 1 (рис. 1) відповідно до стандарту ISO 527-2:2018. Моделі були створені в середовищі CATIA V5, а підготовка G-кодів здійснювалася в програмі UltiMaker Cura. Всі інші параметри друку були зафіксовані з метою виключення впливу сторонніх факторів. Друк здійснювався на принтері Ender 3. Кожен варіант комбінації параметрів був виготовлений у трьох екземплярах, що забезпечує достатню кількість даних для статистичної обробки.

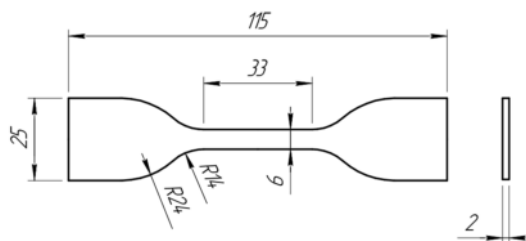


Рисунок 1 - Креслення зразка типу 1

Джерело: розроблено на підставі [11]

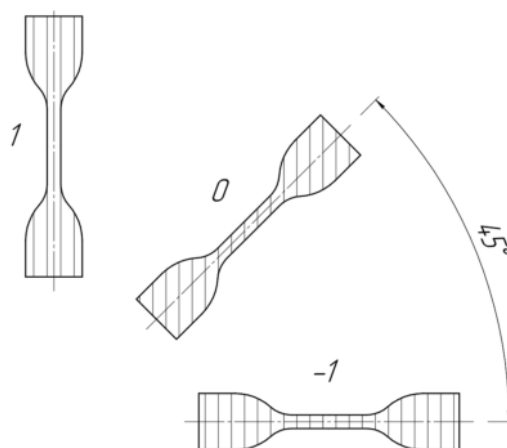


Рисунок 2 - Схема рівнів куту орієнтації шарів друку

Джерело: розроблено авторами

В таблиці 2 представлені кодовані значення факторів обраного повного факторного експерименту [12].

Таблиця 2 - Кодування факторів

Рівень фактору	x_1	x_2	Кодоване значення
Верхній, $x_{i \text{ вер}}$	100%	[90]	+1
Базовий, $x_{i 0}$	65%	[45,-45]	0
Нижній, $x_{i \text{ ниж}}$	30%	[0]	-1

Джерело: розроблено на підставі [12]

Схеми розташування шарів при щільності заповнення 30% наведені на рис. 3.

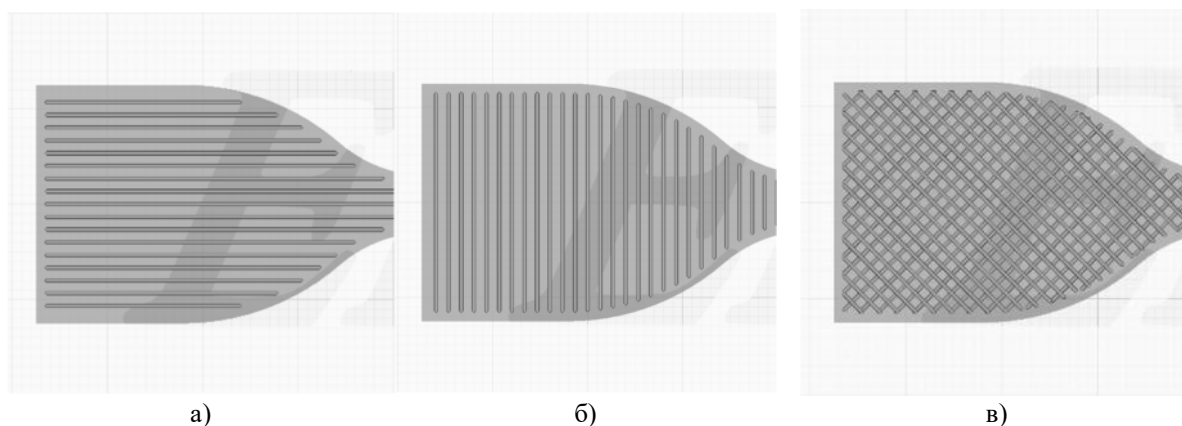


Рисунок 3 – Розташування шарів : а) [90]; б) [0]; в) [45,-45]

Джерело: розроблено авторами

Механічні випробування на розтяг здійснювались на універсальній випробувальній машині TIRATEST 2151 (рис. 4) при швидкості навантаження 2,5 мм/хв. Кожен зразок встановлювався в затискачі таким чином, щоб уникнути його провертання або проковзування, що могло б вплинути на результати випробування. Під час експерименту реєструвалися сила розтягування та відповідне подовження, які згодом були використані для побудови діаграм напруження–деформація. Розрахунок площі поперечного перерізу проводився індивідуально для кожного зразка з урахуванням фактичної ширини і товщини після друку.



а)

б)

Рисунок 4 – Випробувальна установка TIRATEST 2151:

а) – загальний вигляд машини; б) – зразок в захватах установки

Джерело: <https://www.tira-gmbh.de/en/>

Отримані діаграми напруження–деформація (рис. 5) дали змогу визначити межу міцності при розтягуванні, відносне подовження при розриві, а також проаналізувати поведінку матеріалу в робочому діапазоні (до 5% деформації).

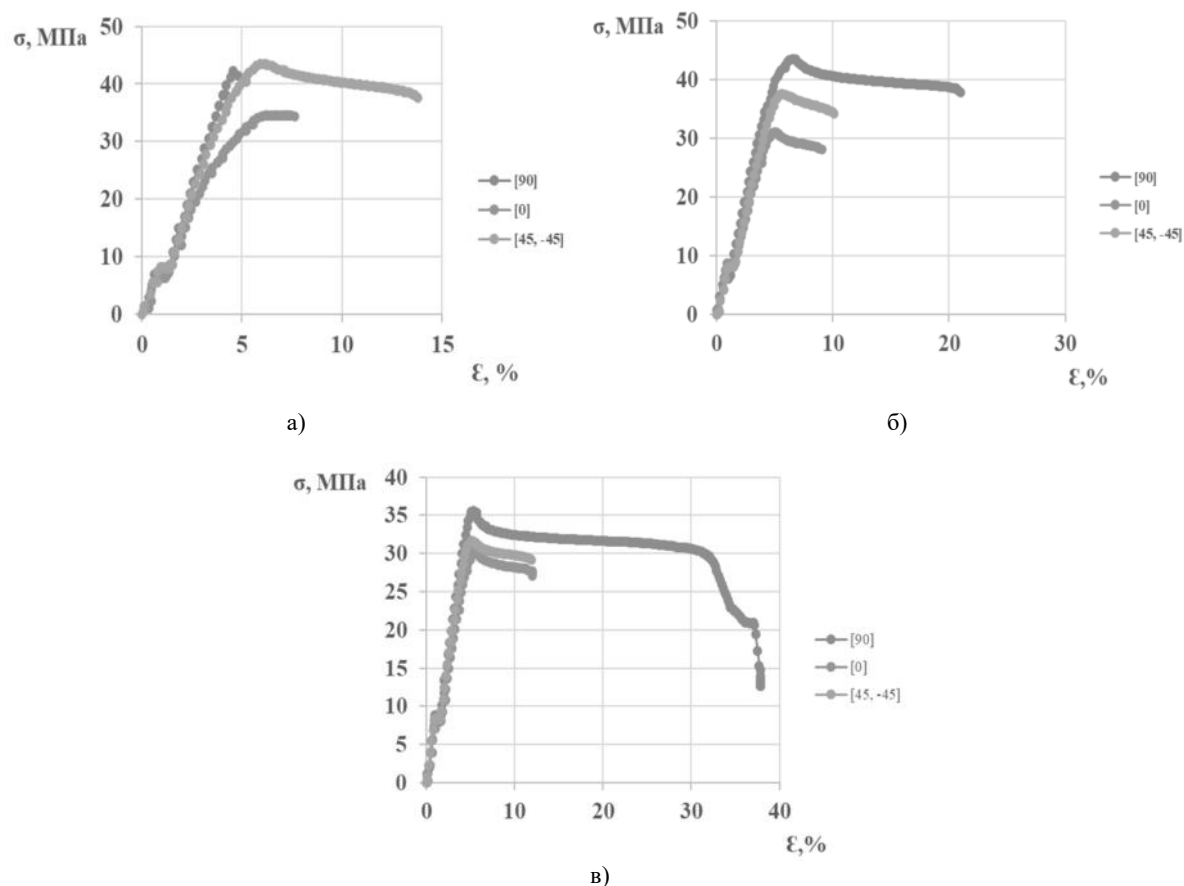


Рисунок 5– Діаграма розтягу зразків з заповненням:

а – 100%, ; б – 65%, в – 30%

Джерело: розроблено авторами

Характер руйнування зразків із різними параметрами друку наведено на рисунку 6.

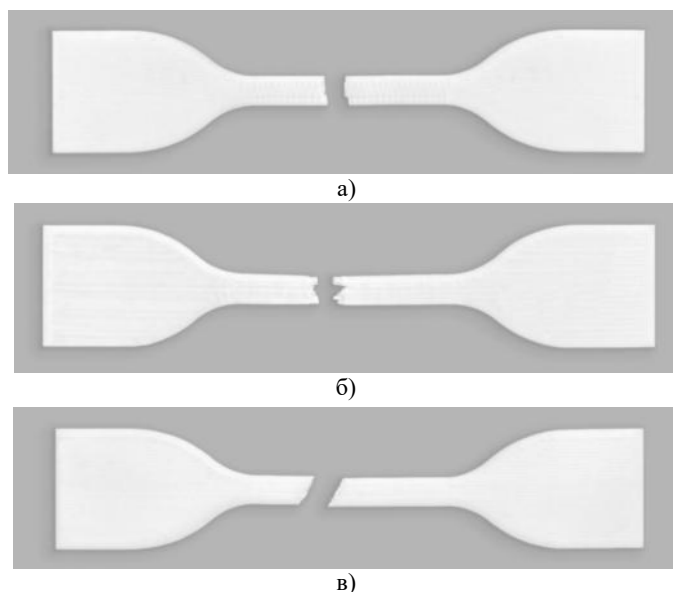


Рисунок 6 – Зразки після руйнування при різних параметрах друку: а) щільність 65%, орієнтація 0°; б) щільність 35%, орієнтація 90°; в) щільність 100%, орієнтація $\pm 45^\circ$

Джерело: розроблено авторами

Спостерігалось, що при зростанні щільності заповнення від 30% до 65% підвищення міцності становить не більше 1%, тоді як перехід від 65% до 100% забезпечує приріст до 41%. Це свідчить про нелінійний характер впливу щільності заповнення. Зі свого боку, орієнтація шарів мала більш виражений ефект. Найбільшу міцність показали зразки, надруковані в орієнтації 90°, а найменшу – при 0°. Варто зазначити, що при заповненні 100% результати для всіх орієнтацій були більш наближеними.

Особливу увагу приділено аналізу деформаційної поведінки у межах до 5% відносної деформації, що є характерною для конструкцій, що не зазнають руйнування, а лише пружно працюють під навантаженням. У цій зоні більшість зразків демонстрували типовий для термопластів ефект початкового м'якшення. Найкращу стабільність у робочій зоні деформації продемонстрували зразки з орієнтацією $\pm 45^\circ$, що поєднують достатню жорсткість із помірною податливістю.

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано регресійну модель, яка описує залежність відносного подовження при розриві від двох факторів. Для цього числові значення факторів були закодовані: щільність заповнення позначена як -1 (30%), 0 (65%), +1 (100%); орієнтація шарів як -1 (0°), 0 ($\pm 45^\circ$), +1 (90°). Регресійна модель має вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 x_2 + b_4 \cdot x_1 z_1 + b_5 \cdot x_2 z_1 + b_6 \cdot z_1 + b_7 \cdot z_2 + b_8 \cdot z_1 z_2 \quad (1)$$

Коефіцієнти моделі визначалися методом найменших квадратів. Значущість коефіцієнтів перевірялась за допомогою критерію Стюдента, а адекватність моделі – за критерієм Фішера, отримали:

$$\hat{y} = (\sigma_b) = 25,653 + 0,11x_1 + 0,083x_2 \quad (2)$$

Обчислення показали, що модель є статистично достовірною на рівні довіри 95%. Для перевірки моделі було додатково виготовлено контрольний зразок з параметрами, що не входили до основного плану експерименту (щільність 75%,

орієнтація 30°). Похибка між передбаченим та експериментальним значенням не перевищила 7%, що підтверджує високу точність побудованої моделі.

Порівняння отриманих експериментальних значень (табл. 3) з теоретичними прогнозованими показує допустимі відносні відхилення [12].

Таблиця 3 – Порівняння експериментальних значень з прогнозованими

№	x_1	x_2	$y = \sigma_B^{\text{експ}}, \text{МПа}$			$y_{\text{ср}} = \sigma_B^{\text{експ}}, \text{МПа}$	$\hat{y} = \sigma_B^{\text{прог}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
1	1	1	42.12	41.85	40.68	41.5487	44.33616	6.7
2	1	-1	34.58	36.51	38.21	36.4341	36.8828	1.2
3	1	0	43.61	44.81	43.19	43.8679	40.60948	7.4
4	0	1	41.95	41.58	43.34	42.2905	40.40567	4.5
5	0	-1	30.96	30.50	30.41	30.6244	32.95231	7.6
6	0	0	37.20	37.18	36.86	37.0777	36.67899	1.1
7	-1	1	36.05	35.39	36.24	35.8907	36.47518	1.6
8	-1	-1	30.17	30.05	30.72	30.3113	29.02182	4.3
9	-1	0	32.61	31.54	32.05	32.0657	32.7485	2.1

Джерело: розроблено на підставі [12]

Для додаткової перевірки регресійної моделі було проведено ще один дослід з проміжними значеннями ступеня заповнення та кутом орієнтації друку (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати перевірки додатковим дослідом

№	$A, \%$	$\theta, ^\circ$	$y = \sigma_B^{\text{експ}}, \text{МПа}$	$\hat{y} = \sigma_B^{\text{прог}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
10	75	30	38.93443	36.55976	6.1

Джерело: розроблено авторами

За результатами розрахунку побудовано діаграми залежності міцності від орієнтації шарів для експериментальних даних та для значень, отриманих за регресійною моделлю (рис.7).

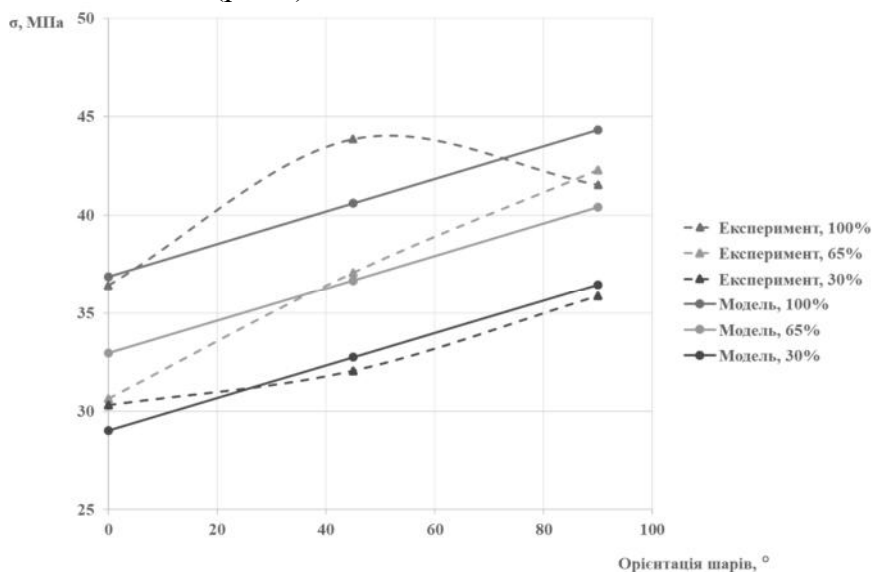


Рисунок 7 – Залежність міцності від орієнтації шарів для різних рівнів щільності заповнення: порівняння експериментальних результатів та даних регресійної моделі

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати мають практичне значення для інженерів, які займаються розробкою функціональних деталей методом FDM-друку. Модель дозволяє передбачити поведінку виробу без фізичного друку зразка, що дає змогу економити час і матеріал. Зокрема, використання 65% заповнення з орієнтацією $\pm 45^\circ$ забезпечує майже ті самі характеристики, що й 100% при орієнтації 90° , але зі зменшенням обсягу використаного PLA до 25%.

Висновки. Проведене дослідження дозволило встановити характер впливу параметрів FDM-друку, зокрема щільності заповнення та орієнтації шарів, на механічну поведінку зразків із PLA. Встановлено, що орієнтація шарів відіграє визначальну роль у формуванні міцнісних властивостей: зразки, надруковані з орієнтацією шарів 90° , демонстрували найвищу межу міцності, тоді як орієнтація 0° значно знижувала опір до розтягування. Щільність заповнення також впливає на результат, однак у межах від 30% до 65% спостерігається лише незначне зростання міцності, тоді як збільшення до 100% забезпечує суттєвий приріст – до 41%, що свідчить про нелінійну залежність цього параметра.

Аналіз поведінки зразків у межах робочої зони деформації (до 5%) показав, що всі зразки мають типовий для термопластів ефект м'якшення на початковій ділянці діаграми напруження–деформація. Найбільш збалансовані характеристики жорсткості та податливості були виявлені у зразків з орієнтацією $\pm 45^\circ$, що робить їх придатними для деталей, які працюють під змінними або помірними навантаженнями.

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано регресійну модель, яка є статистично достовірною та дозволяє здійснювати прогнозування відносного подовження при розриві залежно від параметрів друку. Перевірка моделі на контрольному зразку підтвердила її адекватність із похибкою, що не перевищує 7%. Практичне значення моделі полягає в можливості швидкого підбору оптимальних режимів друку без потреби у трудомістких експериментах.

Загалом, результати дослідження дозволяють зробити висновок про доцільність поєднання середньої щільності заповнення (наприклад, 65%) з орієнтацією шарів $\pm 45^\circ$, що забезпечує економію матеріалу до 25% без істотного погіршення міцнісних характеристик. Запропонований підхід може бути використаний у практиці інженерного проектування виробів, виготовлених методом FDM-друку, з урахуванням конкретних вимог до міцності та ресурсу роботи.

Список літератури

1. Tymoshenko O., Musiienko O., Demeshko Y. Technological damage to structures made by 3D printing. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Vol. 1, № 11(42). P. 101–107. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11\(42\).1.101-107](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11(42).1.101-107).
2. Afshar R., Jeanne S., Abali B. E. Nonlinear Material Modeling for Mechanical Characterization of 3-D Printed PLA Polymer With Different Infill Densities. *Applied Composite Materials*. 2023. Vol. 30. P. 987–1001. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10122-y>.
3. Akhondi S., Christopher-Denny Matte, Tsz Ho Kwok. A study on mechanical behavior of 3D printed elastomers with various infills and densities. *Manufacturing Letters*. 2023. Vol. 35, Supplement. P. 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.035>.
4. Banerjee S. S., Burbine S., Kodihalli Shivaprakash N., Mead J. 3D-Printable PP/SEBS Thermoplastic Elastomeric Blends: Preparation and Properties. *Polymers*. 2019. 11(2):347. <https://doi.org/10.3390/polym11020347>.
5. Fekete I., Ronkay F., Lendvai L. Highly toughened blends of Poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 99. 107205. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107205>.
6. Galeja M., Hejna A., Kosmela P., Kulawik A. Статичні та динамічні механічні властивості АБС-пластиків, надрукованих на 3D-принтері, як функція растрового кута. *Materials*. 13(2), 297.
7. Mirzaali M. J., Caracciolo A., Pahlavani H., Janbaz S., Vergani L., Zadpoor A. A. Multi-material 3D printed mechanical metamaterials: Rational design of elastic properties. *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 113 (24). 241903. <https://doi.org/10.1063/1.5064864>.
8. Pawar A., Ausias G., Corre Y.-M., Grohens Y., Férec J. Mastering the density of 3D printed thermoplastic elastomer foam structures with controlled temperature. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 58. 103066. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103066>.
9. Płatek P., Rajkowski K., Cieplak K. et al. Deformation process of 3D printed structures made from flexible material with different values of relative density. *Polymers*. 2020. 12(9):2120. doi.org/10.3390/polym12092120.
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Технології адитивного виробництва. Springer Science + Business Media. Нью-Йорк, США, 2015. 510 с.

11. ДСТУ EN ISO 527-3:2017. Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 3. Умови випробування для плівок і листів.
12. Білий О. В., Мусієнко О. С. Вплив параметрів 3D-друку на міцність виробів з PLA-пластику. *Інновації молоді в машинобудуванні 2025 : матеріали конференції*. 2025. URL: <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=14690560341301090166&btnI=1&hl=uk>.

References

1. Tymoshenko, O., Musiienko, O., & Demeshko, Y. (2025). Technological damage to structures made by 3D printing. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1, 11(42), 101–107. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11\(42\).1.101-107](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11(42).1.101-107).
2. Afshar, R., Jeanne, S., & Abali, B. E. (2023). Nonlinear Material Modeling for Mechanical Characterization of 3-D Printed PLA Polymer With Different Infill Densities. *Applied Composite Materials*, 30, 987–1001. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10122-y>.
3. Akhondi, S., Christopher-Denny, Matte, & Tsz Ho Kwok. (2023). A study on mechanical behavior of 3D printed elastomers with various infills and densities. *Manufacturing Letters*, 35(Suppl.), 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.035>.
4. Banerjee, S. S., Burbine, S., Kodihalli Shivaprakash, N., & Mead, J. (2019). 3D-Printable PP/SEBS Thermoplastic Elastomeric Blends: Preparation and Properties. *Polymers*, 11(2), 347. <https://doi.org/10.3390/polym11020347>.
5. Fekete, I., Ronkay, F., & Lendvai, L. (2021). Highly toughened blends of Poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern. *Polymer Testing*, 99, 107205. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107205>.
6. Galeja, M., Hejna, A., Kosmela, P., & Kulawik, A. (2020). Statyczne i dynamiczne mechaniczne właściwości ABS- i PLA-tych, nadrukowanych na 3D-drukarze, jako funkcji gęstości i kierunku. *Materials*, 13(2), 297 [in Ukrainian].
7. Mirzaali, M. J., Caracciolo, A., Pahlavani, H., Janbaz, S., Vergani, L., & Zadpoor, A. A. (2018). Multi-material 3D printed mechanical metamaterials: Rational design of elastic properties. *Applied Physics Letters*, 113(24), 241903. <https://doi.org/10.1063/1.5064864>.
8. Pawar, A., Ausias, G., Corre, Y.-M., Grohens, Y., & Férec, J. (2022). Mastering the density of 3D printed thermoplastic elastomer foam structures with controlled temperature. *Additive Manufacturing*, 58, 103066. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103066>.
9. Platek, P., Rajkowski, K., Cieplak, K., et al. (2020). Deformation process of 3D printed structures made from flexible material with different values of relative density. *Polymers*, 12(9), 2120. doi.org/10.3390/polym12092120.
10. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Tekhnologii adyativnoho vyrobnytstva*. Springer Science + Business Media. New York, USA. 510 s. [in Ukrainian].
11. DSTU EN ISO 527-3:2017. (2017). *Plastmasy. Vyznachennia vlastyvostei pid chas roztrahuiannia*. Part 3. Umovy vyprovuvannia dlia plivok i lystiv. *Derzhavnyi standart Ukrainy* [in Ukrainian].
12. Bilyi, O. V., & Musiienko, O. S. (2025). Vplyv parametriv 3D-druku na mitsnist vyrobiv z PLA-plastyku. *Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2025: Materialy konferentsii*. <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=14690560341301090166&btnI=1&hl=uk> [in Ukrainian].

Olha Musiienko, PhD tech. sci., **Oleksandr Bilyi**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Strength of PLA Products Depending on Fill Density and Layer Orientation in FDM Printing

The aim of this research is to evaluate the influence of infill density and layer orientation on the mechanical performance of PLA parts produced via Fused Deposition Modeling (FDM) and to create a predictive regression model for parameter optimization. The study is relevant due to the growing use of additive manufacturing in producing functional components where both mechanical strength and material efficiency are critical. Identifying optimal combinations of printing parameters enables manufacturers to achieve desired properties without unnecessary material consumption.

A full factorial experiment with two factors was carried out: infill density (30%, 65%, 100%) and layer orientation (0°, ±45°, 90°). Tensile specimens of type 1 according to ISO 527-2:2018 were printed on an Ender 3 printer with fixed process settings. Mechanical tests were conducted on a TIRATEST 2151 universal testing machine at a crosshead speed of 2.5 mm/min. The results showed that layer orientation had a more pronounced effect on strength than infill density: the 90° orientation produced the highest tensile strength, while 0° yielded the lowest. Increasing infill density from 30% to 65% had little effect, but raising it to 100% improved strength by up to 41%. In the working deformation range (up to 5%), ±45° orientation offered the best balance of stiffness and elasticity.

A linear regression model describing the relationship between elongation at break and the two factors was developed and validated using statistical criteria, with a prediction error not exceeding 7%. Based on the findings, a 65% infill combined with ±45° layer orientation can achieve strength comparable to 100% infill with 90° orientation, while reducing material use by up to 25%. The developed model can guide the selection of FDM printing parameters to reduce production costs and time, making it applicable to the engineering design of functional PLA components intended for moderate mechanical loads.

FDM printing, PLA, strength, infill density, layer orientation, regression model

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

Gennadiy Filimonikhin, Prof., DSc, **Yulia Ostapchuk**, **Yulia Sokalska**,
Lubov Oliynichenko, Assoc. Prof., PhD, **Volodymyr Pirogov**, Assoc. Prof., PhD
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: filimonikhin@ukr.net

Justification of Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalances of a Propeller

This paper theoretically substantiates new methods for determining the mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of a propeller, applicable to both air and water propellers with fixed pitch. It is proposed to determine the dynamic unbalance twice: first under normal operating conditions, and then under modified conditions in which only the aerodynamic (hydrodynamic) component changes. The proposed methods are based on: varying the density of air, gas, or liquid; applying reverse propeller rotation; and utilizing the ground effect. The aerodynamic (hydrodynamic) unbalance is quantified as a mass-equivalent unbalance, measured with a balancing instrument under defined operating conditions.

propeller, balancing, unmanned vehicle, manned vehicle, balancing device, ground effect

Problem statement. Propellers are widely used in various types of machinery. The primary source of vibration in such equipment is the mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of the propellers. As a result, balancing propellers represents a common and persistent engineering challenge. In single-unit or small-scale production, traditional balancing methods are employed. Aerodynamic (hydrodynamic) balancing is achieved by correcting the geometric profile of the blades, while mass unbalance is corrected using a balancing rig or instrument.

With the advent of small unmanned and manned aircraft, the production of propellers has become large-scale. Under such conditions, traditional balancing methods are no longer feasible due to their labor-intensive nature. For manufactured propellers, a more specific challenge arises — separating the mass and aerodynamic (hydrodynamic) components from the overall dynamic unbalance. This is essential for the development of advanced balancing techniques, for evaluating the manufacturing and balancing quality, and for identifying and rejecting defective units.

Analysis of recent research and publications. Propellers are widely used in manned and unmanned aircraft, surface and underwater vehicles, hovercraft, axial fans, wind turbines, and other applications. A primary source of vibration during the operation of both air [1] and water propellers [2] is mass unbalance and aerodynamic or hydrodynamic unbalance.

Aerodynamic (hydrodynamic) unbalance is similar in effect to mass unbalance. It also consists of static and moment components and generates disturbing forces at the frequency of propeller rotation. As a result, it can be corrected by adjusting the mass distribution [1, 2]. Effective balancing machines and devices have been developed for this purpose [3]. Experimental data demonstrate that the accuracy of simultaneous balancing of both types of unbalance is primarily limited by the precision of the balancing equipment.

But aerodynamic (hydrodynamic) unbalance, unlike mass unbalance, depends on the density of air, gas (liquid), and propeller operating conditions. Therefore, if the propeller is balanced only by adjusting the masses at a certain mode, the balancing accuracy will be violated with changes in the propeller operating conditions.

A promising approach to address these challenges is real-time balancing of both mass and aerodynamic unbalances using passive auto-balancers [4–6]. The operation of these devices is based on the fact that under certain conditions, the corrective weights (balls, rollers, pendulums) in the auto-balancers themselves come to the position in which they balance the rotor.

In [4], it was established numerically for a specific system that at the resonant speeds of rotation of the bladed-disk/shaft, auto-balancers effectively eliminate its mass and aerodynamic unbalance. In [5], it was theoretically established that it is impossible to dynamically balance the impeller of an axial fan (short rotor) with two auto-balancers. But if it is installed in a heavy housing with the possibility of rotation, and the housing is elastically and viscously fixed, then auto-balance will occur at the super-resonant speeds. In [6], these results are confirmed experimentally for the axial fan VO 06-300-4 (Ukraine) with two ball auto-balancers.

The application of passive auto-balancers is effective primarily for rotors mounted on elastically supported shafts operating at supercritical (super-resonant) rotational speeds. This configuration is typically met only by axial fans. Consequently, for the majority of propellers alternative balancing techniques are required.

There is also a simultaneous balancing of two unbalances by aerodynamic means. The fact that aerodynamic unbalance has a significant moment component is used, and the static component can be neglected. In turn, the moment component arises due to the installation of blades with different installation angles. The method is used in the case of variable-pitch propellers - wind turbines, helicopter rotors, aircraft propellers, etc. Let's consider this on the example of wind turbine propellers. Taking wind turbines as an example, the method involves real-time monitoring of vibrational behavior at the tower [7] and nacelle [8], as well as acoustic signatures from individual blades [9]. Then, according to a certain algorithm, the blades are rotated (their pitch is changed), respectively, to minimize vibrations and equalize noise from individual blades. In this case, aerodynamic forces change and at their expense, two types of unbalances are simultaneously balanced. The effectiveness of such methods is increased by using deep machine learning (using neural networks) [10], or conventional machine learning [11]. Aerodynamic (hydrodynamic) balancing has lower accuracy compared to mass correction balancing, since the balancing is not dynamic (not in two correction planes). The method is not applicable for propellers with fixed-pitch.

The best result in balancing fixed-pitch propellers is achieved during the manufacturing stage. These are traditional balancing methods. According to them, the propeller is consistently balanced both aerodynamically (hydrodynamically) and by adjusting the masses.

Aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of a propeller is characterized by geometric inaccuracy in the manufacture of the propeller [1, 2]. Therefore, aerodynamic or hydrodynamic balancing of propellers is ensured by increasing the accuracy of their manufacture.

To verify the accuracy of propeller manufacturing, the propeller is rotated around its shaft, and the blade geometry is measured at designated control points [12]. Based on the measurement results, the shape of the propeller is corrected. After the shape is corrected, the propeller is balanced by adjusting the masses.

An alternative method for verifying manufacturing accuracy involves measuring the pressure generated by individual blades during rotation. Several pressure sensors are installed behind the propeller, arranged in a row along the blade [13]. The propeller is then rotated.

As each blade passes over the sensors, a signal proportional to its lift force is recorded. If the propeller is aerodynamically unbalanced, the blades will produce varying lift forces,

which will be reflected in the sensor outputs. After measuring the lift forces, corrections are made to the shapes of individual blades. The accuracy of the measurements is increased by placing a lattice screen with pressure sensors behind the propeller [1]. The sensors are arranged in rows along the blades. But this complicates the design.

The most precise method for verifying propeller accuracy involves creating a digital information model of the propeller. The information model contains the results of measuring the geometric parameters of the propeller at many control points. The model itself is too bulky, and it takes a lot of time to obtain it. Measurement processes are facilitated through the use of 3D scanners [14], specialized coordinate measuring machines, and photogrammetry (stereophotogrammetry) techniques [15]. To further improve model accuracy, the number of control points and the precision of measurements must be increased, which complicates both the process and the model itself. Nevertheless, the information model enables the development of highly effective geometric correction measures.

The described methods are extremely labor-intensive and therefore are used in single or small-scale production of propellers.

Let us consider small fixed-pitch propellers. These are typically produced in medium or large batches, or even mass-produced. Modifying their geometric shape is generally impractical. For such propellers, a more specific issue arises: the separate identification of mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance. This is essential for developing advanced methods for balancing propellers of various types, assessing balancing quality, measuring residual unbalance, and rejecting defective propellers during mass production.

It is worth noting that digital models of propellers enable the creation of detailed 3D representations [14, 15]. These models can be processed using computer-aided design (CAD) systems to separately identify mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance. However, this approach is labor-intensive and not feasible for mass production.

Let us now examine methods based on the analogy between mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance. In these approaches, aerodynamic (hydrodynamic) unbalance is evaluated through its equivalent mass unbalance.

In [16], the main vector and moment of aerodynamic forces acting on the rotating impeller of an axial fan are determined. Aerodynamic unbalance is found in the following cases: mounting the impeller on the rotor shaft with eccentricity and skew; installing one blade at a different angle of attack; violating the uniformity of the distribution of blades around the circumference. It is established that the impellers of axial fans can be balanced only by adjusting the masses. In this case, the impeller will be balanced over the entire range of rotation speeds, provided that the specific gravity of the air (gas) does not change.

In [17], the aerodynamic unbalance created by a single blade was theoretically investigated and corrective masses were found for its balancing.

According to the results of works [16, 17], it is possible to calculate the mass equivalent of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of the propeller if additional information is available about the inaccuracy of the propeller manufacturing.

There is also an obvious practical method applicable in production conditions. It consists in measuring the propeller mass unbalance twice: in propeller operation conditions or on a stand that emits propeller operation; in (high) vacuum. In operation conditions or on a stand, the total unbalance is determined, and in (high) vacuum, the mass unbalance is determined. This is sufficient to determine the mass unbalance and the mass equivalent of the aerodynamic unbalance. The implementation of the method is described, for example, in [14] for a gas turbine engine rotor. But this is a laborious and expensive process, because it

requires pumping air from the chamber where the mass unbalance is measured, and a person cannot work in such a chamber.

This method is more simply implemented for water propellers. On a balancing machine, the unbalance of the masses of a water propeller rotating in the air is determined. In this case, the aerodynamic component of the unbalance is neglected. On a stand that simulates the operation of a water propeller in a liquid, the total unbalance from masses and hydrodynamics is determined.

The mass equivalent of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of a propeller characterizes this unbalance only under the propeller operating conditions under which it was measured. However, there are such modes of propeller operation that significantly change both the aerodynamic or hydrodynamic forces and the corresponding mass equivalent of the unbalance.

First, this is the reverse rotation of the propeller, which is used quite often [17–20]. Thus, reverse reduces the braking system and accelerates the landing of manned [17] and small unmanned aircraft [18], accelerates landing, picketing, improves the maneuverability of unmanned aerial vehicles [19], improves the maneuverability of ships, swimming vehicles [20]. Reverse rotation of the propeller changes the directions of aerodynamic or hydrodynamic forces and the corresponding mass unbalances to opposite ones.

Secondly, there is the ground (screen) effect [21–23]. This effect becomes noticeable when small [21] or large [22] aircraft operate in ground proximity or near obstacles, as well as during the operation of axial fans in the vicinity of surrounding structures [23]. The ground effect significantly increases the aerodynamic or hydrodynamic forces acting on the propeller and the corresponding mass equivalents.

The considered modes do not change the mass unbalance. They show a significant difference between the mass unbalance and the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of the propeller. The mass equivalent of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance is not as stable as the mass unbalance. This explains why relatively few works use the mass equivalent to estimate the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance. On the other hand, the use of balancing machines or devices allows experimentally and with high accuracy to determine separately the mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance under specific propeller operating conditions.

A review of sources [1–16] shows that practical methods for separately determining the mass and aerodynamic or hydrodynamic unbalance of a propeller are not sufficiently developed. Moreover, we mean methods that correspond to the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance with a mass equivalent. Let us agree to substantiate such methods in the future.

Also, the applicability of reverse propeller rotation [17–20] or the ground effect [21–23] for this has not been investigated.

Statement of the task. The purpose of the research is to propose and theoretically substantiate new practical methods for determining mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalances of propeller. This will make it possible to develop methods for balancing propellers, determine residual unbalances, and reject propellers during manufacturing or repair at the factory.

Research objectives:

- theoretically substantiate new practical methods for determining mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalances of propeller, which are based on: replacing the density of air, gas or liquid; using reverse rotation; using the ground effect;
- theoretically evaluate and compare the effectiveness, accuracy and complexity of implementing the developed methods.

Presentation of the main material

1. Research Methodology

1.1. Basic assumptions. To study propeller unbalance, knowledge from rotor balancing theory, aerohydrodynamics, kinetic theory of gases and liquids [25], vacuum physics [26], physicochemical properties of substances [27], and theoretical mechanics is applied.

The analysis assumes that the blades are exposed to laminar flow, and the aerodynamic forces acting on the propeller can be reduced to a resultant force vector and a resultant moment. In the case of an air propeller, it is further assumed that aerodynamic forces are not significantly affected by Mach and Reynolds numbers. For water propellers, cavitation is considered negligible under operating conditions.

It is also postulated that both mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance (i.e., their mass equivalent) can be determined by measuring the dynamic unbalance under two different conditions: standard operating conditions and modified operating conditions. The modified operating conditions should affect only the aerodynamic or hydrodynamic unbalance. These changes are treated as the introduction of a test (trial) aerodynamic or hydrodynamic unbalance. To improve the accuracy of determining the aerodynamic or hydrodynamic unbalance, the change in unbalance should be no less than 30% [3].

The following modifications to propeller operating conditions are considered:

- changing the density of air, gas, or liquid;
- reversing the direction of propeller rotation;
- placing a screen in front of or behind the propeller.

The effectiveness of these methods for identifying the components of total unbalance will be evaluated based on the following criteria:

- whether the method enables a change in aerodynamic or hydrodynamic unbalance of at least 30%;
- whether additional factors arise that reduce the accuracy of component identification;
- how complex the method is to implement in practice.

Additional assumptions will be introduced as needed in the course of solving the stated problems.

1.2. Rotor marking, unbalance characteristics. Fig. 1 shows the diagram (and marking) of the rotor, which is required for use in algorithms for calculating complex numbers [3].

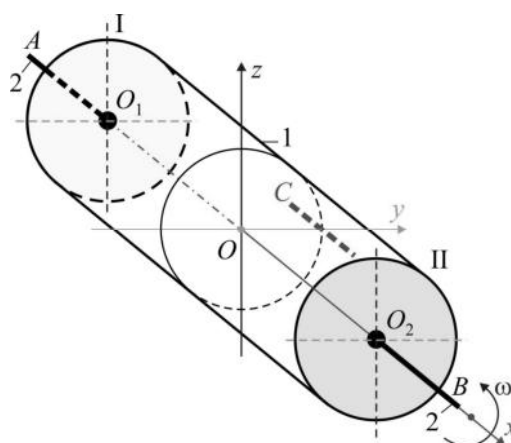


Figure 1– Rotor scheme

Source: developed by the authors

In the Fig. 1: 1 – rotor; 2 – shaft; A – left trunnion; B – right trunnion; I – first correction plane; II – second correction plane; C – zero mark; ω – rotor angular speed.

Let us introduce a rectangular Cartesian coordinate system so that the x -axis lies on the axis of rotation of the rotor and is directed in the direction from which the counterclockwise rotation is visible. The y -axis is directed perpendicular to the axis of rotation in the direction of the mark, and the z -axis so that the coordinate system is right-handed. Two correction planes, I and II, are introduced. The dynamic unbalance of the rotor will be determined within these planes.

Rotor unbalance U_j in the correction plane j shown in fig. 2 [3].

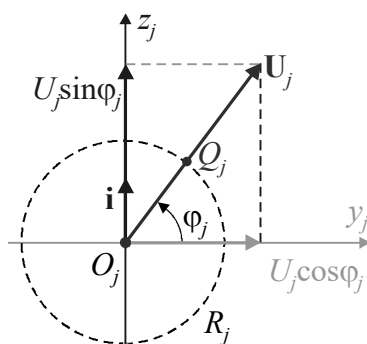


Figure 2– Rotor unbalance in the correction plane j

Source: developed by the authors

The direction of the unbalance vector U_j is determined by the angle φ_j between the y_j axis (parallel to the y axis) and the unbalance vector U_j . As is customary in balancing technology, the angle is calculated in the direction of rotor rotation [3].

The unbalance U_j is formed by a point mass Q_j , installed at a distance R_j from the longitudinal axis of the rotor. The modulus and projections of the unbalance onto the coordinate axes y, z :

$$U_j = Q_j R_j, \quad U_{jy} = U_j \cos \varphi_j, \quad U_{jz} = U_j \sin \varphi_j, \quad / j = 1, 2 /. \quad (1)$$

The rotor unbalance vector in the correction plane j will be defined by a complex number written in algebraic, trigonometric or exponential form:

$$\mathbf{U}_j = U_{jy} + \mathbf{i}U_{jz} = U_j \cos \varphi_j + \mathbf{i}U_j \sin \varphi_j = U_j e^{\mathbf{i}\varphi_j}, \quad / j = 1, 2 / , \quad (2)$$

where:

$$\mathbf{i} = \sqrt{-1}, \quad e^{\mathbf{i}\varphi_j} = \cos \varphi_j + \mathbf{i} \sin \varphi_j, \quad / j = 1, 2 /. \quad (3)$$

It is assumed that a balancing device, stand, or machine is available that enables the determination of rotor dynamic unbalance in the form (2). The method of determining the unbalance, the type of balancing equipment, the design of the machine or stand, and the type of vibration sensors are not considered critical.

2. Research results

2.1. Methods for determining mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalances of a propeller

2.1.1. Using the dependence of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of the propeller on the density of air, gas or liquid

ρ_0 be measured during normal propeller operation, and the total dynamic unbalance of the propeller in two correction planes:

$$U0_j = U0_j^{(m)} + U0_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (4)$$

In (4) on the left are measured (known) quantities, and on the right are unknown quantities, with the index “ m ” representing mass unbalance, and the index “ a ” representing aerodynamic (hydrodynamic) unbalance.

Let the density of the air, gas, or liquid be changed to a new value, ρ_1 . This will result in a change in the overall dynamic unbalance and specifically in its aerodynamic (hydrodynamic) component:

$$U1_j = U0_j^{(m)} + U1_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (5)$$

In (5), it is considered that the mass unbalance will not change when the air density changes.

In [5] it is shown that aerodynamic (hydrodynamic) unbalance is directly proportional to the density of air, gas (liquid). Therefore:

$$U1_j^{(a)} = k_p U0_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (6)$$

Where

$$k_p = \rho_1 / \rho_0. \quad (7)$$

Substituting (6) into (5), we obtain:

$$U1_j = U0_j^{(m)} + k_p U0_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (8)$$

Based on equations (4) and (8), the following formulas are obtained for determining the mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance components under normal propeller operating conditions:

$$U0_j^{(m)} = \frac{U0_j k_p - U1_j}{k_p - 1}, \quad U0_j^{(a)} = \frac{U1_j - U0_j}{k_p - 1}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (9)$$

Consider the case of an air propeller. Within the framework of the molecular-kinetic theory of an ideal gas [25], the density of the gas is:

$$\rho = m / V = p \cdot M / (R \cdot T), \quad (10)$$

where: p – pressure, T – temperature, M is the molar mass of the gas; R is the universal gas constant.

From (10) the following paths of change in air (gas) density follow:

- 1) pressure change;
- 2) temperature change;
- 3) replacement with another gas with a different molar mass.

2.1.2. Using reverse

Let the total dynamic unbalance of the propeller under normal operating conditions be measured, as expressed in equation (4). Let the total dynamic unbalance also be measured during reverse operation of the propeller. In this case, it can be reasonably assumed that the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance changes its direction to the opposite. Therefore, the total dynamic unbalance of the propeller under modified conditions is given by:

$$\mathbf{U}1_j = \mathbf{U}0_j^{(m)} - \mathbf{U}0_j^{(a)}, \quad /j = 1, 2/. \quad (11)$$

From (4) and (11) we find:

$$\mathbf{U}0_j^{(m)} = (\mathbf{U}0_j + \mathbf{U}1_j) / 2, \quad \mathbf{U}0_j^{(a)} = (\mathbf{U}0_j - \mathbf{U}1_j) / 2, \quad /j = 1, 2/. \quad (12)$$

Note that this method of determining the components of propeller unbalance is applicable to both air and water propellers.

The substantiated technical solution is protected by a Ukrainian patent for a utility model [28].

2.1.3. Using the ground effect

Let the axial aerodynamic (hydrodynamic) force F_0 and the total dynamic unbalance of the propeller be measured during normal operation, as defined in equation (4).

Now, let a screen be placed either in front of or behind the propeller. Under these modified conditions, let the axial aerodynamic (hydrodynamic) force F_1 and the corresponding total dynamic unbalance of the propeller be measured:

$$\mathbf{U}1_j = \mathbf{U}0_j^{(m)} + \mathbf{U}1_j^{(a)}, \quad /j = 1, 2/. \quad (13)$$

It is considered here that the mass unbalance will not change when the screen is installed.

We will assume that the aerodynamic or hydrodynamic unbalance has increased in direct proportion to the increase in the axial aerodynamic or hydrodynamic force:

$$\mathbf{U}1_j^{(a)} = k_e \mathbf{U}0_j^{(a)}, \quad k_e = F_1 / F_0 > 1, \quad /j = 1, 2/. \quad (14)$$

Then equation (13) will assume the following form:

$$\mathbf{U}1_j = \mathbf{U}0_j^{(m)} + k_e \mathbf{U}0_j^{(a)}, \quad /j = 1, 2/. \quad (15)$$

From (4) and (15) we find:

$$\mathbf{U}0_j^{(m)} = \frac{\mathbf{U}0_j k_e - \mathbf{U}1_j}{k_e - 1}, \quad \mathbf{U}0_j^{(a)} = \frac{\mathbf{U}1_j - \mathbf{U}0_j}{k_e - 1}, \quad /j = 1, 2/. \quad (16)$$

Note that this method of determining the components of propeller unbalance is applicable to both air and water propellers.

The substantiated technical solution is protected by a Ukrainian patent for a utility model [29].

2.1.4. Generalized mass equivalent of aerodynamic (hydrodynamic) unbalance

Let the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of the propeller under normal operating conditions be determined using one of the proposed methods. Considering equations (6), (11), and (14), the mass equivalent of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance under modified operating conditions of the propeller is determined by the following formula

$$\mathbf{U}1_j^{(a)} = k_p k_e k_\omega \mathbf{U}0_j^{(a)}, \quad /j = 1, 2/. \quad (17)$$

In (17): k_e considered only when installing the screen, otherwise $k_e = 1$;

$$k_\omega = \text{sign}(\omega_1 / \omega_0), \quad (18)$$

where ω_0 is the angular speed of rotation of the propeller under normal conditions, and ω_1 is the angular speed of rotation of the propeller under changed conditions.

This mass equivalent simultaneously considers the change in aerodynamic (hydrodynamic) unbalance from: change in specific gravity of air, gas or liquid; reversal; ground effect. It shows a significant difference between aerodynamic (hydrodynamic) unbalance and mass unbalance. It can be used to model the motion of machines and devices with propellers.

2.2. Assessment of the effectiveness, accuracy and complexity of implementing methods for determining propeller unbalances

2.2.1. Assessing the impact of pressure changes

The method based on pressure variation is applicable only to air propellers. According to equation (10), the density of air (gas) is directly proportional to the pressure. If the air propeller operates in a special chamber with modified pressure, it becomes possible to identify the individual components of the total unbalance of the air propeller. Let the pressure change by k_p times. Then from (10) it follows that the density of air (gas) will also change by k_p times. Then:

$$k_p = k_p \quad (19)$$

and formulas (9) will assume the following form:

$$U0_j^{(m)} = \frac{U0_j k_p - U1_j}{k_p - 1}, \quad U0_j^{(a)} = \frac{U1_j - U0_j}{k_p - 1}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (20)$$

The pressure in the chamber can be increased or decreased. In high vacuum $k_p \approx 0$, formulas (20) take the simplest form [14]:

$$U0_j^{(m)} = U1_j, \quad U0_j^{(a)} = U0_j - U1_j, \quad / j = 1, 2 /. \quad (21)$$

Indeed, in a vacuum there are no aerodynamic forces or aerodynamic unbalance. Therefore, the total unbalance measured in a vacuum coincides with the mass unbalance. In engineering and applied physics, a vacuum is understood as an environment consisting of gas under a pressure lower than atmospheric [26]. In production conditions, the use of a low vacuum region (Low vacuum $p=10^3-1$ mbar). In this case, the pressure in the chamber must be at least 30% less than atmospheric. A person can work in such conditions.

The substantiated technical solution is protected by a Ukrainian patent for a utility model [30].

2.2.2. Assessment of the impact of changes in air (gas) temperature. The method using temperature change is applicable only for air propeller. From (10) it follows that the density of air (gas) is inversely proportional to temperature. If the air propeller will operate in a special chamber with a changed temperature, then it will be possible to determine the individual components of the total unbalance of the air propeller. Let the temperature change by k_T times. From (10) it follows that the density of air (gas) will change by $1/k_T$ times, whence:

$$k_p = 1/k_T. \quad (22)$$

Then formulas (9) will assume the following form:

$$U0_j^{(m)} = \frac{U0_j - U1_j k_T}{1 - k_T}, \quad U0_j^{(a)} = \frac{(U1_j - U0_j) k_T}{1 - k_T}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (23)$$

Let us consider how the change in air (gas) temperature affects aerodynamic unbalance. Normal conditions correspond to a temperature of 0°C (273.2 K). Let the temperature in the special chamber be changed to $+50^{\circ}\text{C}$ (323.2 K). Note that at such a temperature it will be difficult for a person to work in the chamber. The temperature difference is very significant and is $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$. But $k_p = 1/k_T = 273.2/323.2 = 0.845$ and the air density will change (decrease) by only $(1-0.845) \cdot 100 = 15.5\%$. Therefore, it is not advisable to use the change in air temperature to determine the unbalances of the air propeller.

The substantiated technical solution is protected by a Ukrainian patent for a utility model [31].

2.2.3. Assessment of the effect of replacing air (gas) or liquid with a gas or liquid of a different density

The method involving the replacement of air (gas) or liquid with a medium of different density is applicable to both air and water propellers. In this case, air (gas) can be substituted with a liquid (e.g., water), and vice versa. If the air propeller operates in a special chamber filled with another gas, it becomes possible to isolate and determine individual components of the total unbalance of the air propeller. Let the density of the other gas be k_M times greater or less. Then:

$$k_p = k_M, \quad (24)$$

and formulas (9) will assume the following form:

$$U0_j^{(m)} = \frac{U0_j k_M - U1_j}{k_M - 1}, \quad U0_j^{(a)} = \frac{U1_j - U0_j}{k_M - 1}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (25)$$

Below is Table 1, which compares air density with water densities and some gases under normal conditions [27].

Table 1– Comparison of air density with the densities of water and some gases under normal conditions [27]

No.	Gas (liquid)	Density, kg/m^3	Ratio to air density k_M
1	Helium	0.178	0.138
2	Neon	0.900	0.696
3	Air	1.293	1.000
4	Argon	1.784	1.380
5	Carbonaceous	1.977	1.529
6	Krypton	3.743	2.895
7	Water	1000.000	773.395

Source: compiled by the authors using the source [27]

Table 1 lists the cheapest and most explosive gases. The substantiated technical solution is protected by a Ukrainian patent for a utility model [32].

4.2.4. Evaluating the use of reverse rotation or ground effect

Reverse rotation of the propeller most significantly changes the aerodynamic (hydrodynamic) forces, which increases the accuracy of determining the components of the

total unbalance. But the assumption that the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance during reverse has changed direction to the opposite will be sufficiently accurate only for a propeller with flat symmetrical blades. Therefore, non-flat and asymmetrical blades are a source of error in determining the components of the total unbalance.

The use of the ground effect at low air or fluid velocities can increase aerodynamic or hydrodynamic forces by up to a factor of two. This enhances the accuracy of identifying the components of total unbalance. However, it is known that the presence of a screen shifts the center of pressure toward the trailing edge of the blade, which in turn reduces the accuracy of determining the individual components of total unbalance.

4.2.5. Comparison of the complexity of the designs of stands for determining propeller unbalances

Fig. 3 shows a variant of the stand for determining the mass and aerodynamic unbalance of the propeller (axial fan impeller) by any of the proposed methods.

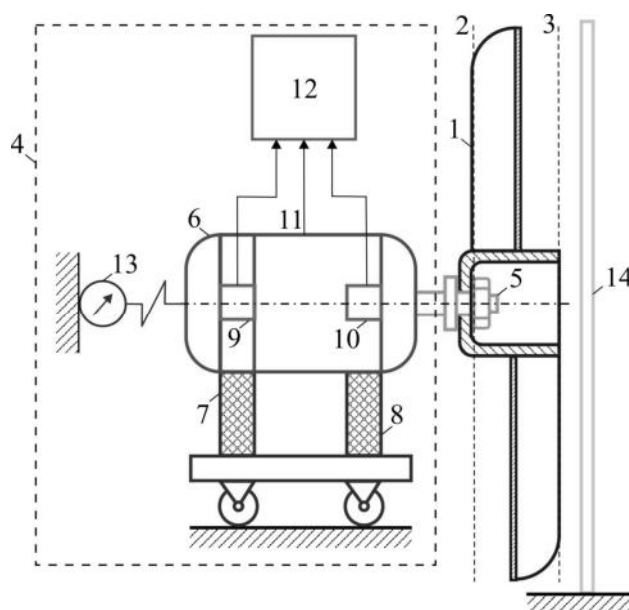


Figure 3 – Possible version of the stand for determining the mass and aerodynamic unbalance of the propeller

Source: developed by the authors

Fig. 3 shows a propeller 1, which has two correction planes 2, 3, in which the propeller unbalance is determined. The propeller is installed on a stand 4. The stand has a shaft 5, on which the propeller is mounted. The shaft rotates in a forward or reverse direction by an electric motor 6. The electric motor is supported by two elastic movable supports 7, 8. Two vibration sensors 9, 10 are installed near the supports. The beginning of a new shaft rotation is recorded by a speed sensor 11. The balancing device 12 receives and processes signals from the vibration and speed sensors, calculates the dynamic unbalance of the propeller in two correction planes. The axial force is measured by a dynamometer 13. A screen 14 is used to create the ground effect.

Vibration sensors can be accelerometers, vibration velocity or vibration displacement sensors. It does not matter in principle which balancing device, by which algorithm and by which method the dynamic unbalance of the propeller is determined. But the best way to determine dynamic unbalance may be the method of three test starts [3].

When using methods for determining propeller unbalances based on changes in air and gas density, reverse propeller rotation, mobility of elastic supports, dynamometer and screen are

not used. These elements can be removed from the design of the stand. But to implement the methods, a chamber is required for changing pressure, temperature or replacing air or gas. This complicates the implementation of the methods.

When using the method based on reverse propeller rotation to determine unbalances, elastic support mobility, a dynamometer, and a screen are not required. These components can be excluded from the stand's design. This makes it the simplest method to implement.

The most complex stand design is associated with the method that utilizes the ground effect. However, the implementation of this method does not require an additional vacuum chamber.

Conclusions

1. To determine the mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalances of a propeller, it is sufficient to measure the dynamic unbalance of the propeller twice using a balancing device. The first measurement is performed under normal operating conditions, and the second under modified conditions that significantly affect the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance while leaving the mass unbalance unchanged. In this way, the mass equivalent of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance can be determined.

To improve the accuracy of identifying the components of the total unbalance, it is recommended to alter the propeller's operating conditions in such a way that the aerodynamic or hydrodynamic unbalance changes by at least 30%.

The following modifications to the operating conditions are considered effective:

- altering the density of air, gas, or liquid;
- reversing the direction of propeller rotation;
- installing a screen either in front of or behind the propeller.

In turn, changes in the density of the working medium can be achieved by:

- replacing air, gas, or liquid with another gas or liquid, including substitution of air or gas with a liquid, and vice versa;
- changes in air or gas temperature for air propellers;
- changes for air or gas pressure propellers.

2. Among these methods, the highest potential accuracy is offered by those based on replacing the fluid medium with one of a different density. However, for air propellers, the method based on temperature variation is difficult to implement due to the need to achieve a temperature change of more than 70°C.

Reverse rotation of the propeller changes the direction of aerodynamic or hydrodynamic unbalance vectors to the opposite, though with a certain degree of error. This error is smaller for flat, symmetrical blades, but the method may still introduce inaccuracies.

The method involving the installation of a screen in front of or behind the propeller not only alters the magnitude of the aerodynamic (hydrodynamic) unbalance but also slightly changes its direction. This, too, may introduce errors into the determination of unbalance components.

List of References

1. Best S. Propeller Balancing Problems. *SAE Transactions*. 1945. Vol. 53. P. 648–659. www.jstor.org/stable/44467824.
2. Majumder P., Maity S. A critical review of different works on marine propellers over the last three decades. *Ships and Offshore Structures*. 2022. 18(3). P. 391–413. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2058767>.
3. Li L., Cao S., Li J., Nie R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*. 2021. 9(5):89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>.
4. DeSmidt H. A. Automatic Balancing of Bladed-Disk/Shaft System via Passive Auto-balancer Devices. *AIAA Journal*. 2010. 48(2). P. 372–386. <https://doi.org/10.2514/1.43832>.

5. Філімоніхін Г. Б., Олійніченко Л. С. Дослідження можливості зрівноваження аеродинамічного дисбалансу крильчатки осьового вентилятора корегуванням мас. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 5(7(77)). С. 30–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195>.
6. Filimonikhina I., Nevdakha Y., Olijnichenko L., Pukalov V., Chornohlazova H. Experimental study of the accuracy of balancing an axial fan by adjusting the masses and by passive auto-balancers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 6(1(102)). P. 60–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184546>.
7. Niebsch J., Ramlau R., Nguyen T. Mass and Aerodynamic Unbalance Estimates of Wind Turbines. *Energies*. 2010. 3(4). P. 696–710. <https://doi.org/10.3390/en3040696>.
8. Bertelè M., Bottasso C. L. Automatic detection and correction of aerodynamic and inertial rotor unbalances in wind turbine rotors. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. 2265. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032100>.
9. Sucameli C. R., Bertelè M., Bottasso C. L. Automatic detection and correction of aerodynamic unbalances: a noise-based approach. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. 2767. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2767/2/022022>.
10. Milani S., Leoni J., Cacciola S., Croce A., Tanelli M. A machine-learning-based approach for active monitoring of blade pitch misalignment in wind turbines. *Wind Energy Science*. 2025. 10. P. 497–510. <https://doi.org/10.5194/wes-10-497-2025>.
11. Li Z., Gao Y. Research on Wind Turbine Unbalance Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2024. 12. P. 176259–176269. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3496921>.
12. International Organization for Standardization. Shipbuilding — Ship screw propellers — Manufacturing tolerances — Part 2: Propellers of diameter between 0.80 and 2.50 m inclusive (ISO 484-2:2015). 2015. <https://www.iso.org/standard/63433.html>.
13. Martin E., Hartford W., Beebe M. Means and methods of balancing propellers. US Patent 2343383A. United States, 1944. IPC G01M1/22. Available: <https://patents.google.com/patent/US2343383A>.
14. Kudashov E., Bolotov M., Grachev I., Pronichev N. Methodology for assessing the aerodynamic unbalance of GTE impellers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1227/1/012004>.
15. Faizin M., Paryanto P., Cahyo N., Rusnaldy R. Investigating the accuracy of boat propeller blade components with reverse engineering approach using photogrammetry method. *Results in Engineering*. 2024. 22. 102293. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102293>.
16. Olijnichenko L., Filimonikhin G., Nevdakha A., Pirogov V. Patterns in change and balancing of aerodynamic unbalance of the low pressure axial fan impeller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 3(7(93)). P. 71–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133105>.
17. Filimonikhin G., Filimonikhina I., Bilyk Y., Krivoblotsky L., Machok Y. Theoretical study into the aerodynamic unbalance of a propeller blade and the correcting masses this balance it. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4(7(112)). P. 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>.
18. Sheets J. H., MacKinney G. W. Reverse-Thrust Propellers as Landing Brakes. *SAE Transactions*. 1945. P. 257–263. <https://www.jstor.org/stable/44467777>.
19. Ma Z., Wang G., Luo S., Luo Q., Zhao Y. A Fast Landing Control Method for Full Wing Solar-powered UAV by Using Propeller Thrust Reversal. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2021. P. 4938–4943. <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601493>.
20. Bass J., Tunney I., Desbiens A. L. Adaptive Friction Shock Absorbers and Reverse Thrust for Fast Multirotor Landing on Inclined Surfaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. 7(3). P. 6701–6708. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3176102>.
21. Yasukawa H., Fujiwara R., Hirata N. et al. Influence of initial disturbances on ship stopping performance by propeller reverse rotation. *Journal of Marine Science and Technology*. 2022. 27. P. 740–758. <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00866-2>.
22. Garofano-Soldado A., Sanchez-Cuevas P. J., Heredia G., Ollero A. Numerical-experimental evaluation of aerodynamic ground effect for small-scale tilted propellers at low Reynolds numbers. *Aerospace Science and Technology*. 2022. 126. 107625. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107625>.
23. Xiang He, Kam K. Leang. Rotorcraft in-ground effect models in axial and forward flight. *Aerospace Science and Technology*. 2025. 156. 109748. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.109748>.
24. Luo Y., Ai T., He Y., Xu B., Qian Y., Zhang Y. Numerical investigation on unstable characteristics of ducted fans in ground effect. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. 36(9). P. 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.04.004>.
25. Kleeman R. D. A Kinetic Theory of Gases and Liquids. USA : Creative Media Partners, LLC, 2022. 288 c.
26. Chambers A. Modern Vacuum Physics. Boca Raton : CRC Press LLC, 2004. 341 c.
27. Poling B. E., Prausnitz J. M., O'Connell J. P. Properties of Gases and Liquids. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2001. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070116825>.

28. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : пат. 165212 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500165 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 16.10.2025. Бюл. № 41/2025.
29. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : пат. 159842 Україна : МПК G01M1/12, G01M1/22 (2006.01). № u202500166 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025. Бюл. № 28/2025.
30. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : пат. 159843 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500167 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025. Бюл. № 28/2025.
31. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : пат. 159914 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500164 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 16.07.2025. Бюл. № 29/2025.
32. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : пат. 159841 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500163 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025. Бюл. № 28/2025.

References

1. Best, S. (1945). Propeller Balancing Problems. *SAE Transactions*, 53, 648–659. www.jstor.org/stable/44467824.
2. Majumder, P., & Maity, S. (2022). A critical review of different works on marine propellers over the last three decades. *Ships and Offshore Structures*, 18(3), 391–413. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2058767>.
3. 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>.
4. DeSmidt, H. A. (2010). Automatic Balancing of Bladed-Disk/Shaft System via Passive Auto-balancer Devices. *AIAA Journal*, 48(2), 372–386. <https://doi.org/10.2514/1.43832>.
5. Filimonikhin, H. B., & Oliinychenko, L. S. (2015). Doslidzhennia mozhlyvosti zrivnovazhennia aerodynamichnoho dysbalansu krylchatky osiovoho ventyliatora korehuvanniam mas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7(77)), 30–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195> [in Ukrainian].
6. Filimonikhina, I., Nevdakha, Y., Oliinichenko, L., Pukalov, V., & Chornohlazova, H. (2019). Experimental study of the accuracy of balancing an axial fan by adjusting the masses and by passive auto-balancers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1(102)), 60–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184546>.
7. Niebsch, J., Ramlau, R., & Nguyen, T. (2010). Mass and Aerodynamic Unbalance Estimates of Wind Turbines. *Energies*, 3(4), 696–710. <https://doi.org/10.3390/en3040696>.
8. Bertelè, M., & Bottasso, C. L. (2022). Automatic detection and correction of aerodynamic and inertial rotor unbalances in wind turbine rotors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032100>.
9. Sucameli, C. R., Bertelè, M., & Bottasso, C. L. (2024). Automatic detection and correction of aerodynamic unbalances: a noise-based approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 2767. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2767/2/022022>.
10. Milani, S., Leoni, J., Cacciola, S., Croce, A., & Tanelli, M. (2025). A machine-learning-based approach for active monitoring of blade pitch misalignment in wind turbines. *Wind Energy Science*, 10, 497–510. <https://doi.org/10.5194/wes-10-497-2025>.
11. Li, Z., & Gao, Y. (2024). Research on Wind Turbine Unbalance Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *IEEE Access*, 12, 176259–176269. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3496921>.
12. International Organization for Standardization. (2015). *Shipbuilding — Ship screw propellers — Manufacturing tolerances — Part 2: Propellers of diameter between 0.80 and 2.50 m inclusive (ISO 484-2:2015)*. <https://www.iso.org/standard/63433.html>.
13. Martin, E., Hartford, W., & Beebe, M. (1944). Means and methods of balancing propellers. *US Patent 2343383A*. IPC G01M1/22. <https://patents.google.com/patent/US2343383A>.
14. Kudashov, E., Bolotov, M., Grachev, I., & Pronichev, N. (2022). Methodology for assessing the aerodynamic unbalance of GTE impellers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1227/1/012004>.
15. Faizin, M., Paryanto, P., Cahyo, N., & Rusnaldy, R. (2024). Investigating the accuracy of boat propeller blade components with reverse engineering approach using photogrammetry method. *Results in Engineering*, 22, 102293. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102293>.
16. Oliinichenko, L., Filimonikhin, G., Nevdakha, A., & Pirogov, V. (2018). Patterns in change and balancing of aerodynamic unbalance of the low pressure axial fan impeller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(93)), 71–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133105>.
17. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Bilyk, Y., Krivoblotsky, L., & Machok, Y. (2021). Theoretical study into the aerodynamic unbalance of a propeller blade and the correcting masses this balance it. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(112)), 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>.
18. Sheets, J. H., & MacKinney, G. W. (1945). Reverse-Thrust Propellers as Landing Brakes. *SAE Transactions*, 257–263. <https://www.jstor.org/stable/44467777>.

19. Ma, Z., Wang, G., Luo, S., Luo, Q., & Zhao, Y. (2021). A Fast Landing Control Method for Full Wing Solar-powered UAV by Using Propeller Thrust Reversal. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 4938–4943. <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601493>.
20. Bass, J., Tunney, I., & Desbiens, A. L. (2022). Adaptive Friction Shock Absorbers and Reverse Thrust for Fast Multirotor Landing on Inclined Surfaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3), 6701–6708. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3176102>.
21. Yasukawa, H., Fujiwara, R., & Hirata, N. et al. (2022). Influence of initial disturbances on ship stopping performance by propeller reverse rotation. *Journal of Marine Science and Technology*, 27, 740–758. <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00866-2>.
22. Garofano-Soldado, A., Sanchez-Cuevas, P. J., Heredia, G., & Ollero, A. (2022). Numerical-experimental evaluation of aerodynamic ground effect for small-scale tilted propellers at low Reynolds numbers. *Aerospace Science and Technology*, 126, 107625. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107625>.
23. Xiang He, & Kam K. Leang. (2025). Rotorcraft in-ground effect models in axial and forward flight. *Aerospace Science and Technology*, 156, 109748. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.109748>.
24. Luo, Y., Ai, T., He, Y., Xu, B., Qian, Y., & Zhang, Y. (2023). Numerical investigation on unstable characteristics of ducted fans in ground effect. *Chinese Journal of Aeronautics*, 36(9), 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.04.004>.
25. Kleeman, R. D. (2022). *A Kinetic Theory of Gases and Liquids*. USA: Creative Media Partners, LLC.
26. Chambers, A. (2004). *Modern Vacuum Physics*. Boca Raton: CRC Press LLC. 341 s.
27. Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). *Properties of Gases and Liquids* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070116825>.
28. Sposib vyznachennia nezrivnovazhenosti povitrianoho hvynta: Patent №165212 Ukraina. MPK G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). №u202500165; zaiavl. 14.01.2025; opubl. 16.10.2025, Biul. №41/2025 [in Ukrainian].
29. Sposib vyznachennia nezrivnovazhenosti povitrianoho hvynta: Patent №159842 Ukraina. MPK G01M1/12, G01M1/22 (2006.01). №u202500166; zaiavl. 14.01.2025; opubl. 09.07.2025, Biul. №28/2025 [in Ukrainian].
30. Sposib vyznachennia nezrivnovazhenosti povitrianoho hvynta: Patent №159843 Ukraina. MPK G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). №u202500167; zaiavl. 14.01.2025; opubl. 09.07.2025, Biul. №28/2025 [in Ukrainian].
31. Sposib vyznachennia nezrivnovazhenosti povitrianoho hvynta: Patent №159914 Ukraina. MPK G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). №u202500164; zaiavl. 14.01.2025; opubl. 16.07.2025, Biul. №29/2025 [in Ukrainian].
32. Sposib vyznachennia nezrivnovazhenosti povitrianoho hvynta: Patent №159841 Ukraina. MPK G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). №u202500163; zaiavl. 14.01.2025; opubl. 09.07.2025, Biul. №28/2025 [in Ukrainian].

Г. Б. Філімоніхін, проф., д-р техн. наук, Ю. О. Сокальська, Ю. О. Остапчук,
Л. С. Олійніченко, доц., канд. техн. наук, В. В. Пирогов, доц., канд. фіз.-мат. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Обґрунтування методів визначення масової та аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості гвинта

Теоретично обґрунтовано нові методи окремого визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості повітряного чи гребного гвинта з фіксованим кроком. Для цього запропоновано визначати динамічну незрівноваженість двічі: за нормальних умов роботи гвинта; за змінених умов, за яких змінюється лише аеродинамічна (гідродинамічна) складова незрівноваженості гвинта.

Запропоновані методи базуються на: зміні густини повітря, газу або рідини; застосуванні реверсивного обертання гвинта; використанні екранного ефекту. Зокрема, зміни густини можна досягти шляхом заміни робочого тіла на тіло з іншою густиною або шляхом зміни його температури чи тиску. Теоретична основа базується на таких властивостях аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості: вона прямо пропорційний густині середовища; її напрямок змінюється на протилежний при зворотному обертанні гвинта; її величина збільшується, коли перед або за гвинтом встановлено екран (екранний ефект). Аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість кількісно визначається як еквівалентна масова незрівноваженість, виміряна балансувальним приладом за певних умов роботи гвинта. Запропонований закон зміни цієї незрівноваженості, що залежить від умови роботи гвинта.

Ефективність цих методів оцінюється на основі їхньої практичної доцільності та потенційного впливу на точність розділення складових незрівноваженостей. Ці результати можуть бути корисними для розробки вдосконалених методів балансування, оцінки залишкової незрівноваженості та контролю якості під час виробництва та ремонту гвинтів.

гвинт, балансування, безпілотний апарат, пілотований апарат, балансувальний пристрій, екранний ефект

Одержано (Received) 18.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 21.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

УДК 621.9.048.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.102-107](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.102-107)**В. М. Шмельов**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: shmelyovvm@gmail.com*

Вилучення зламаного інструмента із застосуванням електроерозійної обробки

Запропоновано новий спосіб вилучення зламаного інструменту із застосуванням електроерозійної обробки. Процес вилучення здійснюють у два послідовні етапи. На першому етапі із застосуванням розмірної обробки електричною дугою отримують отвір не круглого (багатокутного) перерізу під ключ, а на другому – вставляють у отриманий отвір Г-подібний ключ та викручують зламану частину інструмента. Показано, що використання даного способу, порівняно з відомим, дозволяє у 4-5 рази збільшити продуктивність обробки, і у 2-3 рази знизити витрати на отримання електрод-інструментів.

електроерозійна головка, розмірна обробка дугою, настільний свердлувальний верстат, продуктивність обробки, електрод-інструменти

Постановка проблеми. На сучасних підприємствах при виконанні слюсарних робіт поломка мітчиків та іншого інструмента являє собою одну із причин браку деталей. Вона відбувається, головним чином, в наслідок помилок в прийомах роботи та неякісного підбору мітчиків. Іноді, але дуже рідко, вдається викрутити зламану частину мітчика з трьома рядами лез спеціальною триштирковою вилкою. А якщо із отвору сторчить обломок мітчика, частину, що виступає, намагаються захопити плоскогубцями або приварити до неї штир та викрутити. Для вилучення зламаного інструмента, що виготовлено із інструментальної сталі, застосовують послідовну термічну та механічну обробку. При цьому деталь зі зламаним мітчиком нагрівають до температури структурних змін, повільно охолоджують разом з піччю, а далі висвердлюють центральну частину і спеціальним конічним мітчиком викручують залишок. Іноді для вилучення осколків мітчика їх витравлюють розчином азотною кислоти. Процес продовжують декілька годин. Даний спосіб застосовують лише в тому випадку, коли кислота добре розчинює матеріал мітчика та незначно діє на матеріал деталі (наприклад, для алюмінієвих сплавів).

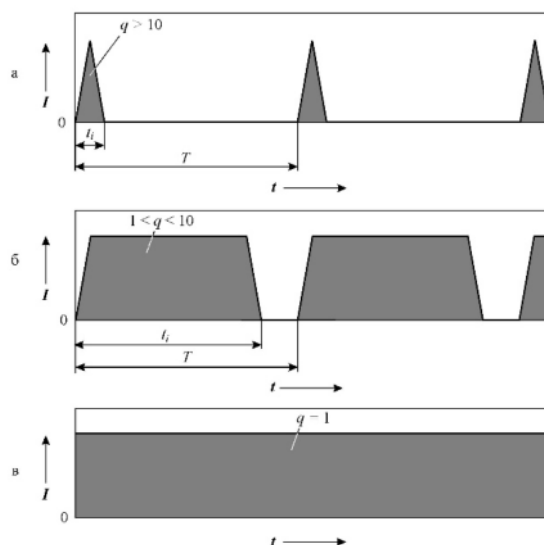
Однак, усі ці способи не є універсальними і не гарантують якісне вилучення зламаного інструмента із деталі. Як альтернативу можна розглянути способи електроерозійної обробки, що дозволяють більш ефективно видаляти зламаний інструмент з деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До електроерозійної обробки, які можуть застосовуватися сьогодні для вилучення залишків зламаного інструмента, відносяться електроіскрова обробка, електроімпульсна обробка та розмірна обробка електричною дугою.

Електроіскрова обробка базується на використанні висококонцентрованих електричних розрядів для знімання матеріалу із заготовки, що обробляється [1, с. 1]. Електроіскрова обробка забезпечує використання електричної енергії безпосередньо для обробки деталей із будь-яких матеріалів, що проводять електричний струм, незалежно від їх фізико-хімічних властивостей, а також зміцнення та легування їх поверхонь.

Для вилучення зламаного інструмента можуть використовуватися різні прошивні електроіскрові верстати, наприклад, фірми «Sodick» [1, 48-49]. В процесі

прошивання руйнується зламана частина електрод-інструментом, виготовленим із круглої мідної трубки. Після прошивання, зламана частина розсипається на дрібні елементи та легко вилучається із деталі.



а – осцилограма електроіскрової обробки; б – осцилограма електроімпульсної обробки; в – осцилограма розмірної обробки дугою; I – сила технологічного струму; t – час обробки; T – період розряду; t_i – час тривалість розряду; q – шпаруватість введення енергії в зону обробки

Рисунок 1 – Характерний вигляд осцилограм для різних способів електроерозійної обробки металів
Джерело: розроблено автором

Електроіскрова обробка використовує в якості джерел живлення RC -генератори [2, с. 6]. Такі генератори створюють для обробки іскрові розряди. Енергія таких розрядів $W_i \approx 0,0003 \dots 2$ Дж, а їх тривалість $t_i \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ с. Енергія в зону обробки вводиться дискретно із шпаруватістю $q > 10$ (рис. 1, а). Що призводить до низької продуктивності електроіскрової обробки. Продуктивності сягає декілька сотень $\text{мм}^3/\text{хв}$ за умов необхідних для руйнування зламаної частини інструмента.

Більшу продуктивність забезпечує електроімпульсна обробка, при якій у якості джерел живлення використовують генератори імпульсів [2, с. 6, 7]. Вони дозволяють вести обробку короточасними іскродуговими та дуговими розрядами. Тривалість таких імпульсів $t_i \approx 10^{-2} \dots 10^{-4}$ с з шпаруватістю $1 < q < 10$, що, в порівнянні з електроіскровим способом, забезпечує менші паузи (рис 1, б). Продуктивність обробки при електроімпульсній обробці становить декілька тисяч $\text{мм}^3/\text{хв}$.

В роботах [3-7] викладено спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД – розмірна обробка дугою), який застосовується для вилучення зламаного інструмента. При реалізації прошивання отвору здійснюється електричною дугою, що горить безперервно між електрод-інструментом (ЕІ) (мідною круглою трубкою) та електрод-заготовкою (ЕЗ) (зламаною частиною інструмента) в потоці робочої рідини. Джерелом живлення струмом верстатів РОД може слугувати зварювальний випрямляч. Використання зварювальних випрямлячів дозволяють вводити в зону обробки великі струми, що значно підвищує продуктивність обробки. При цьому продуктивність процесу збільшується, порівняно з електроімпульсною обробкою, в 8-10 разів. Таким чином, час прошивання отвору при РОД значно менший між при електроімпульсній обробці.

Вилучення зламаного інструмента здійснюється на установці РОД з використанням електроерозійної головки (рис. 2). Процес здійснюється шляхом прошивання глибокого круглого отвору в зламаній частині, після чого залишки зламаного інструменту кришаться на дрібні елементи, що дозволяє легко вилучається їх із отвору деталі. Установка створена на базі настільного свердлувального верстата [7, с.

202]. Вона не потребує внесення змін в конструкцію базового верстата, з ручним приводом шпинделя з електроерозійною головкою, має невисоку вартість і займає порівняно малу площу.

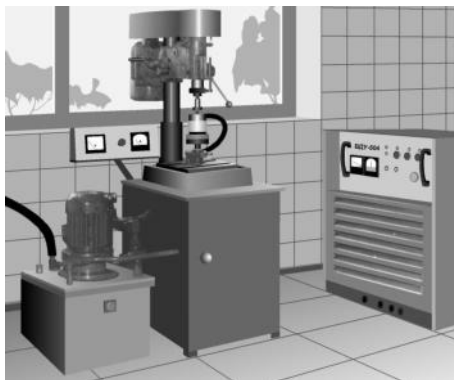


Рисунок 2 – Електроерозійний верстат з прошивною головкою на базі настільного свердлильного верстата

Джерело: розроблено автором

Оскільки висота зламаної частини інструмента може досягати 50 мм, об'єм металу, що підлягає електроерозії, є значним, а тому і необхідний час на прошивання отвору залишається достатньо значним.

Крім того, необхідно враховувати, що великий знос електрод-інструмента з мідного, який завжди перевищує 30 %, суттєво підвищує вартість обробки.

За роботами [7, 8] відомо, що найбільшу електроерозійну стійкість при РОД металів забезпечують графітові ЕІ: їх лінійний знос може бути значно меншим 1 %. Показано, що малий знос графітового ЕІ при РОД пов'язаний з утворенням та його поверхні двофазного металографітового шару, що в процесі обробки постійно поновлюється. Цей шар сприймає теплове навантаження від горіння дуги.

Слід відмітити, що використання малозносних графітових електрод-інструментів для РОД отвору в зламаній частині інструмента утруднюється проблемою їх виготовлення: малий діаметр, велика довжина.

Дослідження показали, що для покращення експлуатаційних характеристик вилучення зламаного інструменту методами електроерозійної обробки необхідно: забезпечити найбільшу продуктивність обробки; для зменшення часу обробки необхідно суттєво зменшити глибину обробки (це дозволить використовувати короткі графітові ЕІ для багаторазового застосування); для зменшення глибини обробки необхідно запропонувати інший принцип вилучення зламаного інструмента. В цьому зв'язку, певний практичний інтерес являє новий спосіб вилучення зламаного інструменту із застосуванням електроерозійної обробки, який враховує наведені вище особливості. Такий спосіб не був об'єктом дослідження.

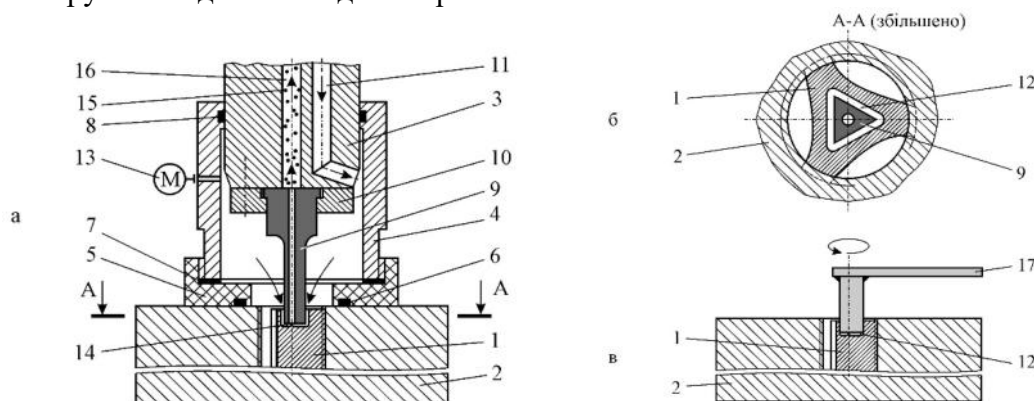
Постановка завдання. Метою дослідження є поліпшення експлуатаційних характеристик способу вилучення зламаного інструменту методами електроерозійної обробки за рахунок застосування запропонованого принципу вилучення.

Виклад основного матеріалу. В новому способі вилучення зламаного інструменту способом РОД пропонується процес вилучення виконувати послідовно у два етапи. Перший етап: з використанням графітового ЕІ, який встановлений в електроерозійну головку РОД отримують отвір під ключ не круглого (багатокутного) перерізу. Другий етап: вставляють у отриманий в мітчику отвір Г-подібний ключ та викручують його зламану частину. Процес видалення зламаної частини мітчика 1 показано на рисунку 3.

На першому етапі деталь 2 із зламаною частиною мітчика 1 закріплюють на столі настільного свердлувального верстата. В патрон верстата встановлюється електроерозійна головка, яка включає в себе електродотримач 3, рухому герметизовану

камеру 4, із закріпленим на ній електроізолятором 5 та гумовими ущільнювачами 6, 7, 8. Графітовий ЕІ 9 кріплять у електродотримачі 3 тримачем 10. Відносно ЕІ 9 позиціонують деталь 2 із зламаною частиною мітчика 1 та фіксують на столі верстата.

Далі герметизовану камеру 4 руками опускають у низ до щільного контакту електроізолятора 5 з поверхнею деталі 2 і фіксують притисками. Вмикають станцію робочої рідини для подачі у внутрішню порожнину герметизованої камери 4 крізь отвір 11 робочої рідини в електродотримачі 3, вмикають джерело живлення постійним струмом та прошивають багатокутного отвору 12 під ключ 17 коротким графітовим ЕІ 9 шляхом ручної подачі шпинделя верстата.



а – схема формування отвору під ключ з використанням електроерозійної головки для РОД;
 б – переріз А-А у збільшеному масштабі електрод-інструмента та отвору в зламаному мітчику;
 в – схема викручування зламаного інструмента Г-подібним ключем

Рисунок 3 – Схема реалізації способу вилучення зламаного інструменту (мітчика) із застосуванням електроерозійної обробки

Джерело: розроблено автором.

Тиск робочої рідини в середині герметизованої камері 4 контролюють за допомогою манометричного показчика 13, величину сили струму контролюють за допомогою амперметра, а глибини на яку здійснюється прошивання за допомогою годинникового індикатора (на схемах не показано).

Під час обробки електрична дуга 14 горить між поверхнею ЕІ 9 та торцевою частиною отвору 12. Продукти ерозії 15 вилучаються із зони обробки потоком робочої рідини крізь канал 16. Режим обробки підбирають такими, при яких виступ в центральній частині отвору 12 не утворюється. За даними роботи [2, с. 125-129], зазначений режим відповідає максимальній силі струму, мінімально діаметру технологічного отвору в ЕІ для видалення робочої рідини з продуктами ерозії, підвищеній напрузі на електродах, а також мінімально допустимому статичному тиску робочої рідини, який забезпечує сталість процесу обробки. За таких умов продукти ерозії на вході в технологічний отвір в ЕІ створюють струмопровідні «містки» спонукаючи виникнення довгих дуг, що руйнують виступ. Забезпечуючи умови протікання процесу прошивання отвору без утворення виступу та використання Г-подібного ключа дає змогу зменшити глибину обробки отвору електроерозією в 4-5 разів, тим самим зменшити час обробки. До того ж, для прошивання отвору 12 меншої глибини потрібно виготовляти короткі та технологічні у виробленні графітові ЕІ 9.

Форма перерізу отвору 12 буде залежить від типу зламаного інструмента. Наприклад, для мітчиків з трьома лезами доцільно застосовувати ЕІ трикутної форма перерізу, а з чотирма лезами, відповідно квадратної. За допомогою цього способу можна вилучати зламані гвинти. При цьому доцільна форма перерізу отвору у формі шестикутника.

Лінійний знос графітових ЕІ 9 (зазвичай не перевищує 1 %) при використанні в якості робочої рідини суміші мастила і гасу у рівних пропорціях. Що дозволяє багаторазово використовувати графітовий ЕІ 9.

Для викручування зламаного мітчика 1 в отриманий, способом РОД, отвір 12 вставляють Г-подібний ключ 17 і обертають проти годинникової стрілки, якщо мітчик був для нарізування «правої» різьби, а якщо для отримання «лівої» різьби обертають за годинниковою стрілкою.

Проведено серію експериментів по дослідженні продуктивності M процесу РОД в залежності від сили технологічного струму I і статичного тиску робочої рідини P_s в результаті чого отримано математичну модель:

$$M = 1,323 \cdot I^{1,519} \cdot P_s^{-1,738} \quad (1)$$

Графік залежності продуктивності M процесу РОД від сили технологічного струму I і статичного тиску робочої рідини P_s показано на рисунку 4.

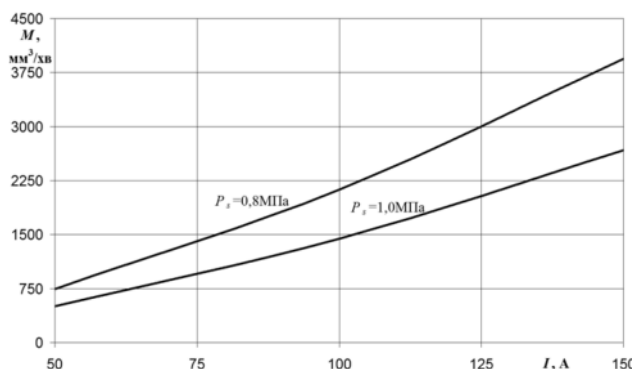


Рисунок 4 – Графік залежності продуктивності M процесу РОД від сили технологічного струму I і статичного тиску робочої рідини P_s

Для прикладу розглянемо видалення зламаного мітчика для нарізання різьби М14. Зазвичай злам мітчика відбувається в області переходу від різьбової частини мітчика до циліндричної частини по канавкам для відводу стружки. Для мітчика М14 довжину зламаного мітчика в середньому 30мм. Для видалення мітчика електроіскровою обробкою може бути використана мідна трубка зовнішнім діаметром 8мм і товщиною стінки 1мм, при цьому площа обробки становитиме 22мм², при довжині 30мм необхідно видалити 660мм³ металу мітчика, з урахуванням зносу трубчастого електрода 60-80% від глибини обробки необхідно використати електрод робоча частина якого повинна бути не меншою 55мм. Зважаючи на продуктивність обробки, в зазначених умовах в залежності від режиму обробки, межах 30...200мм³/хв [9], час обробки сягатиме від 4 до 22хв. При електроімпульсній обробці, зважаючи на більшу продуктивність обробки 3-5разів, час обробки може сягати 1,5...4хв.

При застосуванні запропонованого способу видалення зламаного інструмента способом РОД в мітчику достатньо виготовити глухий отвір трикутної форми з довжиною сторони трикутника 6мм і глибиною 6мм, відповідно площа обробки сягатиме 15,6мм², а об'єм металу, який необхідно видалити 93,6 мм³. При обробці струмом 100А продуктивність обробки сягатиме в межах 1500...1700мм³/хв [7, с. 121], теоретичний час обробки складатиме 0,06хв. Навіть зважаючи на характеристики електроерозійної головки РОД АМН-1 [10] з максимальною швидкістю прошивання 20мм/хв час обробки на глибину 6мм сягатиме 0,3хв, що більш ніж в 4 рази швидше ніж при електроімпульсній обробці.

Висновки. 1. Запропоновано та розроблено новий спосіб вилучення зламаного інструмента способом РОД, та описано принцип його реалізації.

2. Дослідження показали, що використання запропонованого способу вилучення зламаного інструменту дозволяє у 4-5 рази збільшити продуктивність обробки, і у 2-3 рази знизити витрати на отримання електрод-інструментів.

Список літератури

1. Ставицкий Б. И. Из истории электроискровой обработки материалов. Х. : ПРАТ «Полиграф сервис», 2013. 104 с.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою : монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. 300 с.
3. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.03.07. Київ : НТУУ «КПІ», 1999. 36 с.
4. Боков В. М., Попова М. І. Обробка отворів електричною дугою : монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2014. 160 с.
5. Боков В. М., Сіса О. Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою : монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013. 172 с.
6. Боков В. М. Фізичні процеси спец технологій. Експериментальні дослідження : збірник статей, навчальний посібник. Кропивницький : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2022. 625 с.
7. Носуленко В. І., Шмельов В. М. Розмірна обробка металів електричною дугою : навчальний посібник. Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 256 с.
8. Боков В. М., Маркашова Л. И. Электроэрозионная стойкость графитовых электродов-инструментов при размерной обработке металлов электрической дугой. *Автоматическая сварка*. 2002. № 6. С. 45–48.
9. Maurya S. K., Campatelli G., Veracini M., Arcioni M., Clori D. Balancing productivity and sustainability in EDM: A comprehensive analysis of energy consumption and electrode degradation. *Machines*. 2023. 13(6). 469.

References

1. Stavytskyi, B. I. (2013). *From the history of electro-erosive material processing*. Polihraf Servis. 104 p. [in Russian].
2. Bokov, V. M. (2002). *Dimensional formation of surfaces by electric arc: Monograph*. Imeks. 300 p. [in Ukrainian].
3. Nosulenko, V. I. (1999). *Dimensional processing of metals by electric arc: Doctoral thesis abstract*. NTUU KPI. 36 p. [in Ukrainian].
4. Bokov, V. M., & Popova, M. I. (2014). *Hole processing by electric arc: Monograph*. Imeks. 160 p. [in Ukrainian].
5. Bokov, V. M., & Sisa, O. F. (2013). *Machinability of materials by electric arc: Monograph*. Imeks LTD Publishing Center. 172 p. [in Ukrainian].
6. Bokov, V. M. (2022). *Physical processes of special technologies. Experimental research: Collection of articles, textbook*. Imeks LTD Publishing Center. 625 p. [in Ukrainian].
7. Nosulenko, V. I., & Shmelov, V. M. (2017). *Dimensional processing of metals by electric arc: Textbook*. Ekskliuzyv-System Publishing. 256 p. [in Ukrainian].
8. Bokov, V. M., & Markashova, L. I. (2002). *Electro-erosive resistance of graphite tool-electrodes during dimensional processing of metals by electric arc*. *Avtomaticeskaya Svarka*, 6, 45–48 [in Russian].
9. Maurya, S. K., Campatelli, G., Veracini, M., Arcioni, M., & Clori, D. (2023). Balancing productivity and sustainability in EDM: A comprehensive analysis of energy consumption and electrode degradation. *Machines*, 13(6), 469.

Vitalii Shmelov, Assoc. Prof., PhD

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Extraction of a Broken Tool with the Use of Electroerosion Processing

At modern enterprises, when performing locksmith work, the breakdown of taps and other tools is one of the reasons for the lack of parts. It occurs, mainly, as a result of errors in work methods and poor selection of taps. Known methods of mechanical extraction of a broken tool are not universal and do not guarantee high-quality extraction. In this regard, the methods of electroerosion processing are of some practical interest, as they are more universal and reliable.

EDM methods that can be used today to remove the remains of a broken tool include EDM, EDM, and EDM. It is shown that the most productive method is the method of dimensional processing of metals using an electric arc (ARC). Its performance is 8-10 times higher than the performance of electric pulse processing. That is why the well-known method of removing a broken tool is carried out with the help of an EDM head, which implements the ROD method. The head is created on the basis of a desktop drilling machine. Round electrodes-tools made of a copper tube are used to stitch the hole in the broken part of the tool.

However, since the height of the broken part of the tool can reach 50 mm, the volume of metal to be destroyed is large, and therefore the time spent on piercing the hole remains quite significant. In addition, the large linear wear of the copper electrode-tool significantly affects the cost of processing, and the use of low-wear graphite electrodes-tools for ROD of the hole in the broken part of the tool is complicated by the problem of their manufacture: small diameter, long length.

The purpose of the study is to improve the operational characteristics of the method of extracting a broken tool with the use of electroerosion processing due to the application of another extraction principle. In the new method of removing a broken tool using electroerosion treatment, the process is proposed to be carried out in two stages. At the first stage, with the help of an EDM head for ROD, a shallow recess of a non-round (triangular, quadrilateral or hexagonal) section is formed for the metal cutting machine. The process is carried out with a short graphite electrode-tool. On the second, an L-shaped key is inserted into the recess and the broken part is unscrewed by rotating it. It is shown that its use improves operational characteristics and allows to reduce processing time by 4-5 times, and to reduce the cost of tool electrodes by 2-3 times.

EDM head, dimensional arc machining, bench drilling machine, machining performance, tool electrodes

Одержано (Received) 13.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

UDC 621.664

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.108-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.108-116)

Kyryl Shcherbyna, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Hodorodozha**,
Andrii Kyrychenko, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

e-mail: kir2912s@ukr.net

Research on the Manufacturing Precision of Gear Meshing in Group 3 Hydraulic Gear Pumps

The article presents the results of a study of the manufacturing precision parameters of the gear meshing of group 3 hydraulic gear pumps. The relevance of the study is due to the increased operational loads on pumps of this group, which requires ensuring high precision of the geometric parameters of gear wheels in order to achieve optimal tightness, reduce hydraulic losses, and ensure durability of the meshing elements.

The study analyzes main technological errors that arise in the manufacture of gear wheels, namely: profile deviation, pitch deviation, concentricity deviation, and lateral clearance deviation. The influence of these deviations on the main hydro-mechanical characteristics of group 3 gear pumps, including efficiency, vibration and noise levels, as well as the wear resistance of meshing elements under high loads, was assessed. Modern measuring instruments, in particular optical and contact profilometry, were used to control geometric accuracy, which made it possible to quantitatively assess the precision of machining.

Based on the data obtained, recommendations for improving the technology of processing gear wheels of group 3 pumps are substantiated. In particular, the effectiveness of shaving as one of the key stages in achieving the required accuracy is analyzed. It has been proven that the use of this method allows achieving the precision of 7–8 according to DIN 3962, significantly reduces surface roughness parameters, and contributes to improving contact endurance. Particular attention is paid to the influence of heat treatment modes on the stability of the geometric parameters of the meshing, especially under variable load conditions.

During the analysis of shaving gear pumps of group 3, it was found that the maximum deviations are observed in the indicators of accumulated pitch error and radial runout of the gear rim, which have a critical impact on the level of pulsation of volumetric delivery and resistance to fatigue failure. The results obtained allow us to form a substantiated technological strategy for the manufacture of high-precision gear transmissions for pumps operating in severe operating conditions.

Thus, the results of the study are significant for improving the efficiency and reliability of Group 3 hydraulic gear pumps, which are widely used in power engineering, mobile equipment, and industrial hydraulic systems. Improving the precision of meshing elements directly affects the stability of pump output parameters, such as volumetric flow and torque, which is critical in ensuring functional reliability of hydraulic systems.

tooth machining, shaving, gear meshing, gear hydraulic pump, precision

Problem statement. The precision of manufacturing gear meshing of hydraulic gear pumps is a determining factor in ensuring their efficient, uninterrupted, and long-lasting operation. Gear pumps are widely used in hydraulic drive systems in various industries where the reliability and stability of hydraulic equipment are critical. Any deviations from the specified geometric parameters of the meshing elements can lead to additional dynamic loads, increased noise and vibration levels, intensive wear of contact surfaces, and a decrease in the efficiency of hydraulic machines.

The tooth shaving operation, which is a key stage in the finishing of gear wheels, is of particular technological importance in the production process. This process significantly reduces profile shape errors, minimizes surface roughness, and ensures high stability of meshing parameters under loads typical for the operation of group 3 pumps. Due to the ability to influence the microgeometry of the surface and the level of residual stresses, shaving increases contact endurance of the teeth, which is critical for operation under variable pressures and high rotational velocity.

The relevance of conducting an in-depth study of the shearing process is determined by

the need to optimize the processing route, aimed at achieving high precision indicators while rationalizing resource and time costs. A comprehensive analysis of precision characteristics, as well as the development of methods for their measurement and control, make it possible to create a scientifically sound basis for improving gear cutting technologies. In particular, establishing dependencies between the parameters of shaving modes and manufacturing precision makes it possible to achieve stable results even when manufacturing large series of wheels.

Improving the processes of tooth surface shaping, taking into account the effect of shaving on the microgeometry, physical and mechanical characteristics of the surface layer, is important for improving the performance of hydraulic gear pumps. The results of such research will contribute not only to improving the quality of the final product, but also to the formation of a competitive scientific and technical base for the development of precision machining technologies in mechanical engineering.

Precision manufacturing of meshing in hydraulic gear pumps plays a key role in ensuring their efficient and long-lasting operation. These pumps are widely used in various industries where stability and reliability of equipment are critical. Deviations in meshing parameters can lead to increased noise levels, vibrations, excessive wear of parts, and reduced efficiency. Of particular importance for ensuring precision is the process of tooth shaving, which is an important stage in the finishing of gear wheels. It minimizes profile errors, improves surface quality, and ensures stable meshing under operating conditions.

The relevance of a detailed study of shaving is determined by the need to optimize technological process aimed at achieving high manufacturing precision at minimum production costs. An in-depth analysis of manufacturing precision parameters and the development of methods for their control will contribute not only to improving the quality of hydraulic pumps, but also to improving existing processing technologies. Improving the processes of machining gear meshes is an important step towards expanding scientific knowledge in this field, which at the same time ensures economic and technological competitiveness of production.

Analysis of recent research and publications. Based on a systematic analysis of scientific publications, it has been established that the gear is the main element that receives and transmits main loads during operation of hydraulic gear pumps. It ensures torque transmission, hydraulic flow formation, and withstands dynamic loads associated with high working environment pressures, which leads to increased requirements for its manufacturing precision, rigidity, and wear resistance [1, 2, 3, 4].

Research of the functional characteristics of hydraulic gear machines is relevant, as confirmed by a significant number of scientific works by both national [5, 6] and foreign researchers [8, 9, 10]. In addition, it is worth noting the active patent activity aimed at improving the design of hydraulic gear machines [11].

At the same time, based on the external appearance of the studied parts, in particular, the nature of the macro-relief of the bottom of the groove and the micro-relief of the tooth profile, it is possible to identify with a sufficient degree of probability technological techniques used in their processing:

- preliminary mechanical processing was carried out using the worm gear cutting method;
- final mechanical processing was performed using shaving method;
- the profile was finished after chemical-thermal treatment using diamond honing method.

Table 1 shows the parameters of the achieved accuracy of gear wheels of imported pumps by gear rim (elements of cyclic surface of the gear rim - ECSGR).

Table 1 – Parameters of modern imported gear pumps.

Parameters name DIN3962	Designation	Moreali m=1,75 z=12	BOSCH m=2,54 z=12	OMFB m=4,5 z=10	Eaton m=2,79 z=12
Profile deviation	$f_{f\alpha}$	7/7	6/7	6/7	6/8
Profile direction deviation	$f_{H\alpha}$	7/7	10/10*	10/10*	-
Deviation of tooth direction	F_{β}	6/5	10/7	9/8	7/7
Accumulated pitch deviation	F_p	5/7	9/8	7/8	8/8
Radial runout of gear rim	F_r	6	9	8	9
Roughness	Ra	-	0,2	0,2	-

Source: developed by the authors

Figure 1 shows the surfaces and imported gear pumps.

However, a number of requirements not taken into account in the design documentation require additional coordination with the technological capabilities of production. This is due to the fact that such requirements can only be met through the implementation of specialized technological techniques that are critical to ensuring functional characteristics of the components.

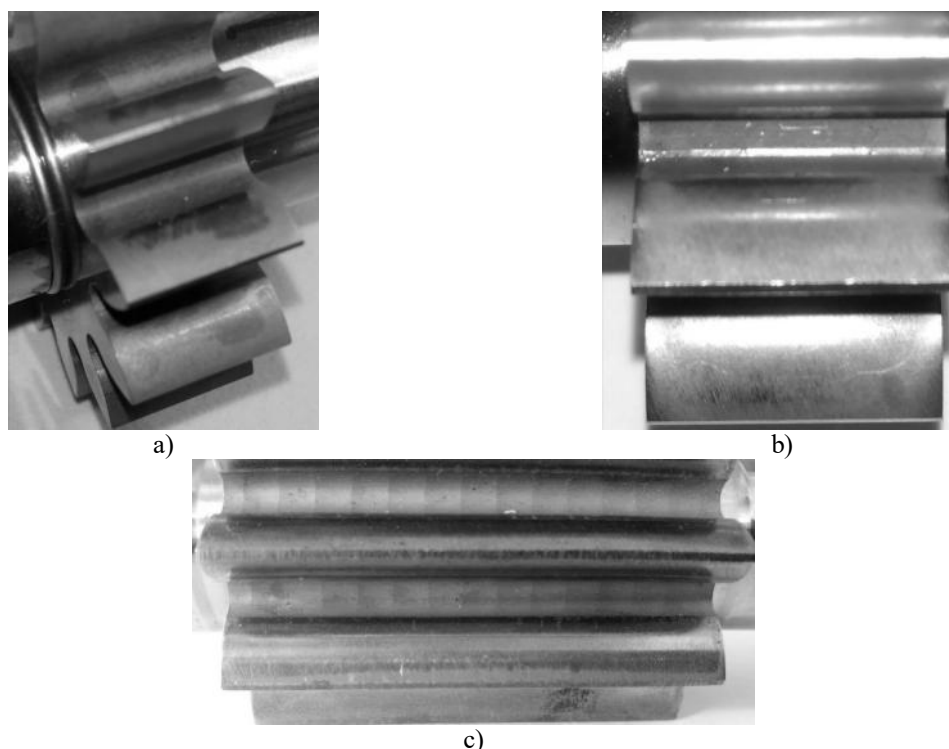


Figure 1 – Tooth profile of imported gear pumps

a) pump «Eaton»; b) pump «Sauer»; c) pump «OMBF».

Source: developed by the authors

The greatest operational loads are borne by involute edges (IE) and cylindrical edges (CE), which is explained by their functional role in separating the pressure and suction zones of the working space of a hydraulic gear pump. In this regard, these elements are subject to increased requirements for shape precision, dynamic strength, and resistance to contact wear.

During operation, IE and CE are subjected to intense contact loads, which, under conditions of uneven loading or residual technological stresses, can lead to local destruction or loss of geometric stability. Therefore, when forming edges, it is necessary to exclude the use of technological methods that contribute to the appearance of stresses in the surface layer, in particular sharp transitions, unacceptable thermal effects, or abrasive micro-wear.

In addition, to ensure reliable sealing and stable contact with adjacent surfaces, the edges must meet high geometric precision requirements, including minimal spatial deviations. Failure to comply with these parameters leads to a violation of contact density, an increase in internal leaks and, as a result, a decrease in the energy efficiency (performance index) of the hydraulic unit.

Objective statement. The objective of this work is to conduct scientific research on the process of finishing machining of gear meshing in hydraulic gear pumps, in particular using the shaving method, taking into account precision parameters regulated by the requirements of DIN 3962. The research is aimed at studying the influence of shaving modes on the formation of precision and quality characteristics of the tooth surface, as well as ensuring stable operational properties of finished parts in the hydraulic unit.

Main material. The research is planned to be carried out on a gear cutting machine model BCH-732NC22-7745 (Fig. 2), which provides high-precision finishing of gear wheels. Geometric parameters of the machined parts will be checked using a Carl Zeiss Contura G2 coordinate measuring machine (Fig. 3), which allows for precise measurement results in accordance with precision standards.

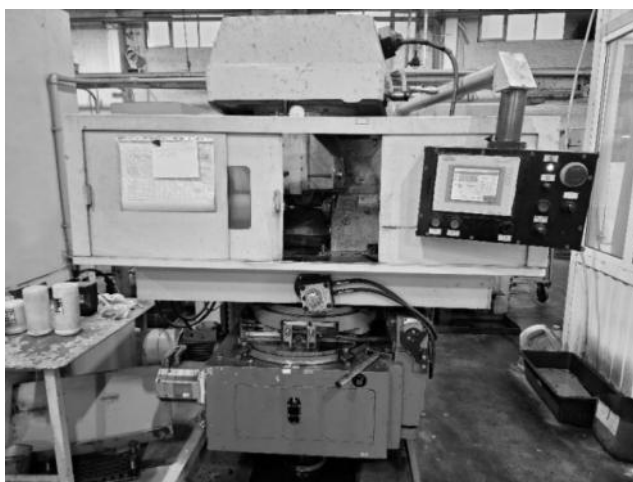


Figure 2 – Gear cutting machine. Model BCH-732NC22-7745

Source: [12]



Figure 3 – Tooth measuring machine Mahr GMX 275

Source: [13]

The shaving of a batch of 100 gears will be performed using processing modes that were determined to be optimal during previous experimental studies. These modes are listed in Table 2 and ensure compliance with the precision parameters in accordance with the requirements of DIN 3962, in particular for the following indicators:

- $ff\alpha$ – tooth profile deviation;
- $fH\alpha$ – tooth profile direction deviation;
- Fp – accumulated tooth pitch error;
- Fr – radial runout of the gear rim.

Table 2 – Modes of shaving of gear meshing

№	Parameter	Value
1	Radial feed S_{rad} , mm/pass	0,02
2	Number of passes	5
3	Longitudinal feed S pass, mm/pass	56
4	Shaver rotation frequency n_{III} , rot./min.	63
5	Allowance, mm	0,04...0,05

Source: developed by the authors

All controlled parameters will be recorded in the report generated by the Mahr GMX275 tooth measuring machine in accordance with DIN 3962 (Fig. 4).

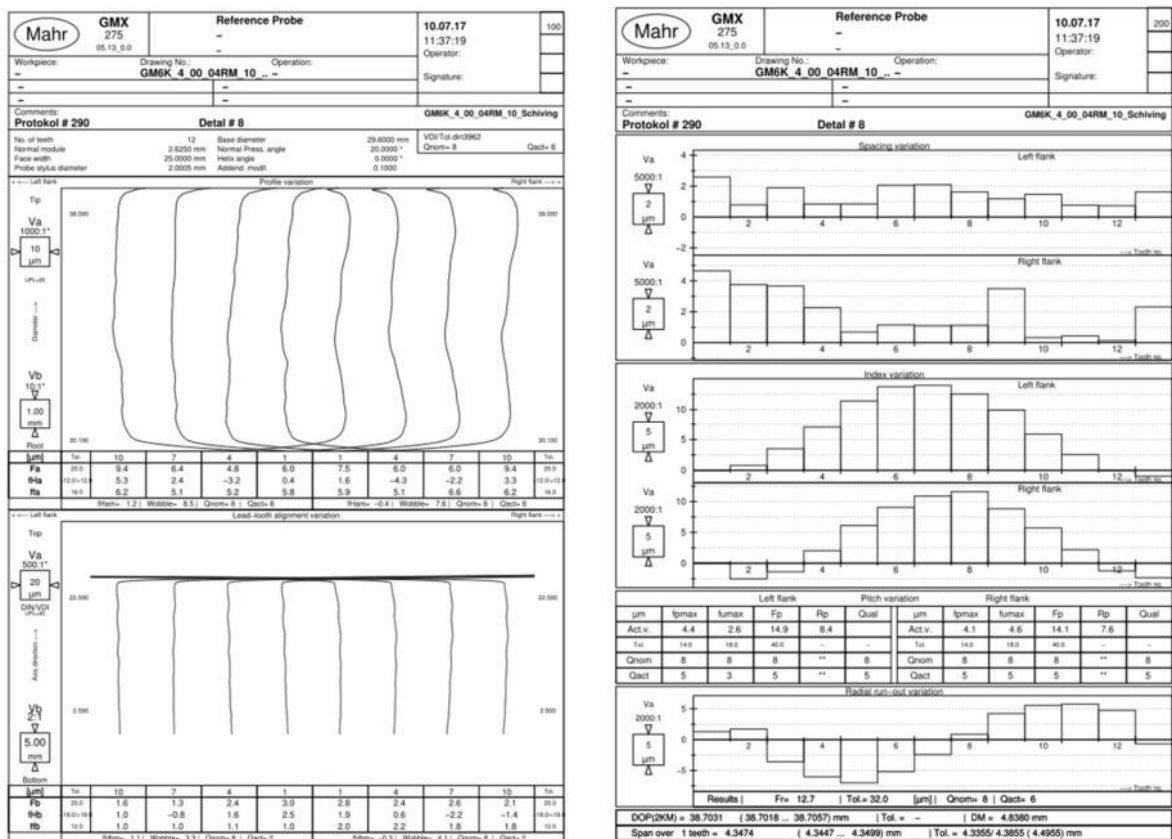
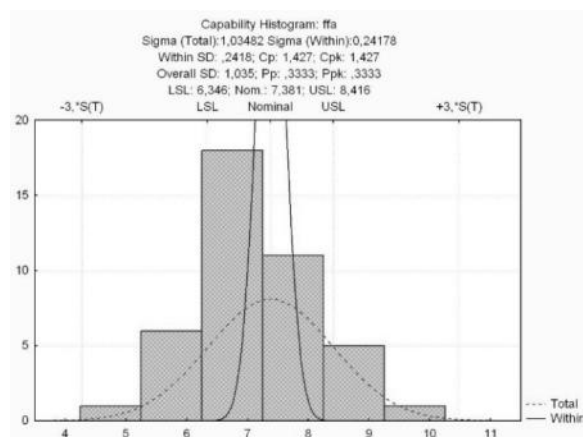


Figure 4 – Report on measuring a part on a coordinate measuring machine Mahr GMX 275

Source: [13]

The results of processing a batch of gears, presented in a histogram in accordance with DIN 3962 requirements, show that the profile parameter $ff\alpha$ has a generally normal distribution with a nominal value of 7.381 and tolerance limits $LSL = 6.346$ and $USL = 8.416$, but some values exceed the permissible limits. The C_p and C_{pk} coefficients (1.427) indicate sufficient short-term accuracy, while the low P_p and P_{pk} (0.333) indicate significant long-term dispersion due to the influence of external and technological factors. To ensure stability and compliance with the standard requirements, it is necessary to reduce the dispersion, stabilize the processing modes, and adjust distribution center to the nominal value.

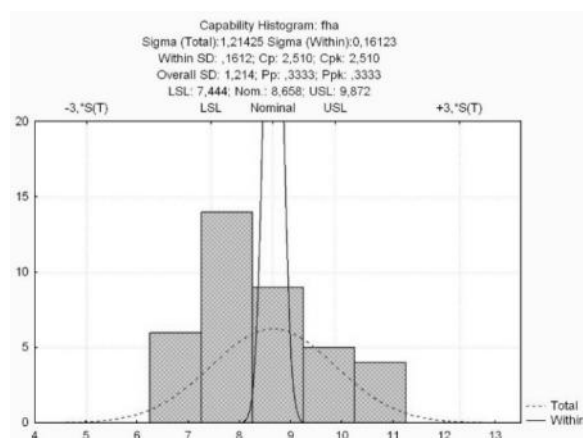
The results of the $fH\alpha$ parameter analysis show that at the nominal value of 8.658 and tolerance limits of $LSL = 7.444$ and $USL = 9.872$, the distribution of measured values generally follows a normal distribution, but there is noticeable dispersion, which negatively affects process stability. The process capability coefficients C_p and C_{pk} (2.510) confirm the high short-term accuracy of processing, but the low values of P_p and P_{pk} (0.333) indicate problems with long-term repeatability caused by external and technological factors, such as tool wear, equipment rigidity fluctuations, or temperature instability. The majority of measurements are concentrated near the nominal value, but some values exceed the specification tolerances, which can lead to defects. To ensure stability and compliance with DIN 3962 requirements, it is necessary to reduce dispersion, optimize processing modes, increase the rigidity of the “machine-tool-workpiece” system, ensure control and stability of the temperature environment, and improve the technical control system at all stages of production.



total – total distribution of parameter deviation $ff\alpha$; within – internal variability of the parameter deviation process $ff\alpha$

Figure 6 – Histogram and normal distribution law of tooth profile parameter deviation $ff\alpha$

Source: developed by the authors

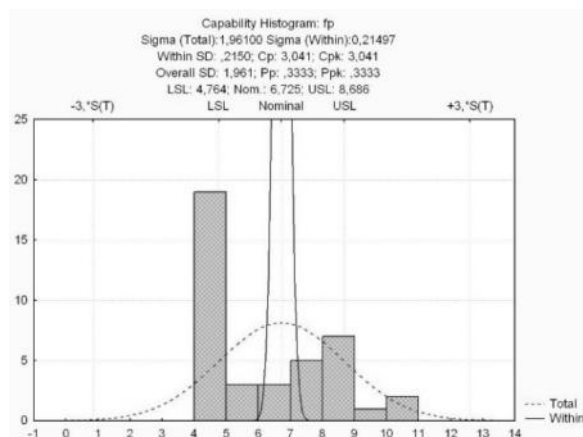


total – total distribution of parameter deviation $fH\alpha$; within – internal variability of the parameter deviation process $fH\alpha$

Figure 7 – Histogram of the normal distribution law of deviation in the tooth profile direction parameter $fH\alpha$

Source: developed by the authors

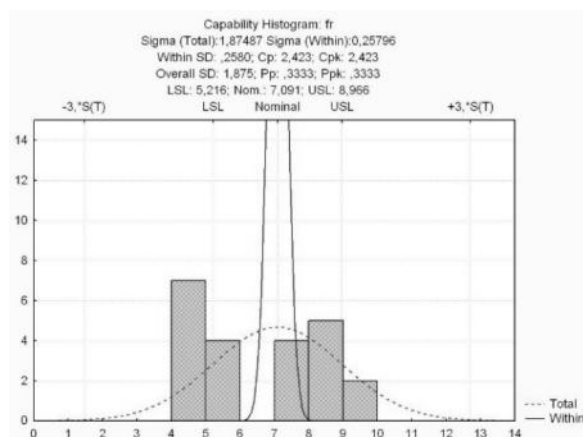
The results of the fp parameter analysis show that at the nominal value of 6.725 and tolerance limits of LSL = 4.764 and USL = 8.686, the distribution of values is close to normal but has a left skew, indicating asymmetry in the manufacturing process. High short-term coefficients Cp and Cpk (3.041) demonstrate the process's ability to ensure precision within tolerances, but low Pp and Ppk (0.333) and a significant overall standard deviation (1.961) indicate long-term instability and increased dispersion of results. The main concentration of values near the lower tolerance limit, as well as the output of some data beyond it, can cause defects due to violation of the accuracy of the tooth pitch. To improve stability and compliance with DIN 3962, it is necessary to optimize processing modes, increase the rigidity of the technological system, monitor the condition of the tool, and reduce the influence of external factors, which will improve the long-term reproducibility of the fp parameter in serial production.



total – total distribution of parameter deviation Fp; within – internal variability of the parameter deviation process Fp

Figure 8 – Histogram and normal distribution law of the deviation of the accumulated error parameter of the tooth pitches Fp

Source: developed by the authors



total – total distribution of parameter deviation Fr; within – internal variability of the parameter deviation process Fr

Figure 9 – Histogram and normal distribution law of the radial runout parameter deviation of the gear rim Fr

Source: developed by the authors

The results of the fr parameter analysis show that at the nominal value of 7.091 and tolerance limits of LSL = 5.216 and USL = 8.966, the distribution of values is close to normal but has a left skew, and some of the measurements fall below the lower tolerance limit. High short-term Cp and Cpk coefficients (2.423) indicate the process's ability to ensure accuracy under stable conditions, however, low Pp and Ppk (0.333) and a significant overall standard deviation (1.875) indicate instability in the long term due to external and technological factors. To ensure stability and compliance with DIN 3962 requirements, it is necessary to

reduce dispersion, adjust the distribution center, stabilize processing modes, and improve the control of tool condition and temperature conditions, which will increase the long-term reproducibility of the f_r parameter.

In general, the histogram in Fig. 7-9 reflects the process that has a normal distribution, but a wide dispersion of values leads to exceeding the acceptable deviation limits. This indicates the need for optimization – either by reducing the spread of values or by adjusting the center of distribution to ensure stability and compliance with the established limits.

Conclusions. Analysis of the shaving process of gear meshing in group 3 gear pumps showed that the use of this method significantly improves the accuracy of the geometric parameters of teeth and the quality of their surfaces. Reducing the roughness of the profile has a positive effect on the contact endurance and performance characteristics of parts, increasing their service life. The results of the study showed that the actual accuracy of the manufactured gears corresponds to grades 7–8 according to DIN 3962. At the same time, the greatest differences in indicators are observed in the parameters of the accumulated tooth pitch error and the radial runout of the gear rim. It has been established that the low quality level according to f_{Ha} parameter is due to the need for optimal selection of the allowance shape for shaving and the elimination of measurement errors. Periodically repeated errors in the positioning of parts during gear cutting lead to significant deviations in F_p parameter. The lack of rigid fixation of the gear cutting machine table also significantly affects the stability of this parameter. Thus, to improve accuracy, it is necessary to optimize the allowance shape, improve the positioning methods, and ensure increased rigidity of the machine tool equipment.

List of References

1. Функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини / М. М. Підгаєцький, К. К. Щербина та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 8(39). С. 3–10.
2. Апаракін А. Р. Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки* : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. Вип. 7(38), ч. 2. С. 51–58.
3. Матвієнко О. О. Математична модель втрат робочої рідини через радіальний зазор шестеренного насоса типу НШ. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : зб. наук. праць КНТУ. 2005. Вип. 16. С. 235–240.
4. Дослідження параметрів точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів групи 1 / К. К. Щербина та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Т. II, № 10(41). С. 65–74. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.65-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.65-74).
5. Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та сільськогосподарської техніки / Кулешков Ю. В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 4(36), ч. 1. С. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203).
6. Кулешков Ю. В. Підвищення технічного рівня шестеренного насоса на основі нових фізичних і математичних моделей робочого процесу подачі : дис. д-ра техн. наук : 05.05.17. Харків, 2013. 442 с.
7. Кириченко А. М., Щербина К. К., Годорожа В. А. Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насосу. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2023) : матеріали XIII міжнар. наук.-практ. конф.* (25–26 травня 2023 р., м. Чернігів). Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. Т. 1. С. 288–289.
8. Yang Zhou, Bowen Che, Ci Yuan. The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. 10(12). С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288>.
9. Zardin B., Natali E., Borghi M. Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*. 2019. 12, 2468. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468>.
10. Fang Guo, Zongde Fang. Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Shock and Vibration (Hindawi)*. 2018. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453>.
11. Gear pump cavitation reduction : пат. 7878781 B2 United States : МПК F01C 2L/00. № 12/001,279 ; заявл. 11.12.2007 ; опубл. 01.02.2011.
12. Expert tools : веб-сайт. URL: <https://www.etum.in.ua/product-category/zubobrobni-verstaty/page/1/> (дата звернення : 20.01.2025).
13. Mahr : веб-сайт. URL: <http://technopolice.com.ua/mahr/mahrgear-zubovymiryuvannya/>.

References

1. Pidhaiets'kyi, M. M., Shcherbyna, K. K., et al. (2023). Functional portrait of a gear hydraulic machine. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39), 3–10. [in Ukrainian].
2. Aparakin, A. R. (2023). Modular-parametric principle of developing projects of gear hydraulic machines. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 7(38), Part 2, 51–58. [in Ukrainian].
3. Matviienko, O. O. (2005). Mathematical model of working fluid loss through the radial gap of an NSH-type gear pump. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 16, 235–240. [in Ukrainian].
4. Shcherbyna, K. K., et al. (2024). Study of accuracy parameters in manufacturing of gear engagement of hydraulic pumps (group 1). *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, II, 10(41), 65–74. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.65-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.65-74). [in Ukrainian].
5. Kulieshkov, Yu. V., et al. (2022). Increasing the supply of gear pumps for vehicles and agricultural machinery. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 4(36), Part 1, 197–203. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203). [in Ukrainian].
6. Kulieshkov, Yu. V. (2013). *Improving the technical level of a gear pump based on new physical and mathematical models of the delivery process* (Doctoral thesis). Kharkiv. 442 p. [in Ukrainian].
7. Kyrychenko, A. M., Shcherbyna, K. K., & Hodorozha, V. A. (2023). Functional portrait of a gear hydraulic pump. *Proceedings of KZIATPS-2023: Comprehensive quality assurance of technological processes and systems* (pp. 288–289). Chernihiv Polytechnic National University. [in Ukrainian].
8. Zhou, Y., Che, B., & Yuan, C. (2018). The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(12), 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814018819288>.
9. Zardin, B., Natali, E., & Borghi, M. (2019). Evaluation of the hydro-mechanical efficiency of external gear pumps. *Energies*, 12, 2468. <https://doi.org/10.3390/en12132468>.
10. Guo, F., & Fang, Z. (2018). Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Shock and Vibration*, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2018/9645453>.
11. Gear pump cavitation reduction: Patent 7878781 B2, United States. IPC F01C 2L/00. No. 12/001,279. Filed 11.12.2007; published 01.02.2011.
12. Expert Tools: website. www.etum.in.ua/product-category/zubobrobni-verstaty/page/1/ (accessed 20.01.2025).
13. Mahr: website. <http://technopolice.com.ua/mahr/mahrgear-zubovymiryuvannya/>.

К. К. Щербина, доц., канд. техн. наук., **В. А. Годорожа**, **А. М. Кириченко**, проф. д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університету, м. Кропивницький, Україна

Дослідження точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів гр.3

У статті представлено результати дослідження параметрів точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів групи 3. Актуальність дослідження зумовлена підвищеними експлуатаційними навантаженнями на насоси цієї групи, що вимагає забезпечення високої точності геометричних параметрів зубчастих коліс з метою досягнення оптимальних показників герметичності, зниження гідравлічних втрат та забезпечення довговічності елементів зачеплення.

У ході дослідження проаналізовано основні технологічні похибки, що виникають при виготовленні зубчастих коліс, а саме: відхилення профілю, кроку, концентричності та бокового зазору. Оцінено вплив зазначених відхилень на основні гідромеханічні характеристики шестеренних насосів групи 3, включаючи коефіцієнт корисної дії, рівень вібрацій і шуму, а також зносостійкість елементів зачеплення при високих навантаженнях. Для контролю геометричної точності застосовано сучасні засоби вимірювання, зокрема оптичну та контактну профілометрію, що дало змогу здійснити кількісну оцінку точності обробки.

На підставі отриманих даних обґрунтовано рекомендації щодо удосконалення технології обробки зубчастих коліс насосів групи 3. Зокрема, проаналізовано ефективність шевінгування як одного з ключових етапів досягнення необхідної точності. Доведено, що застосування цього методу дозволяє забезпечити досягнення 7–8 ступеня точності за DIN 3962, суттєво знижує параметри шорсткості поверхонь та сприяє покращенню контактної витривалості. Окрему увагу приділено впливу режимів термічної обробки на стабільність геометричних параметрів зачеплення, особливо в умовах роботи при змінних навантаженнях.

Під час аналізу шевінгування зубчастих коліс шестеренних насосів групи 3 встановлено, що найбільші відхилення спостерігаються за показниками накопиченої похибки кроків та радіального биття зубчастого вінця, які мають критичний вплив на рівень пульсацій об'ємної подачі та стійкість до втомного руйнування. Отримані результати дозволяють сформулювати обґрунтовану технологічну стратегію виготовлення високоточних зубчастих передач для насосів, що функціонують у важких режимах експлуатації.

Таким чином, результати дослідження є значущими для підвищення ефективності та надійності гідравлічних шестеренних насосів групи 3, які широко застосовуються в енергомашинобудуванні, мобільній техніці та системах промислової гідравліки. Удосконалення точності елементів зачеплення безпосередньо впливає на стабільність вихідних параметрів насосів, таких як об'ємна подача та крутний момент, що є критичним у контексті забезпечення функціональної надійності гідравлічних систем.

зубообробка, шевінгування, зубчате зачеплення, шестеренний гідравлічний насос, точність

Одержано (Received) 06.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

Д. В. Янюк*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна**e-mail: yanyuk_10719366@lutsk-ntu.com.ua*

Оцінка стабільності осьового позиціонування торця довгомірної циліндричної заготовки при автоматичній подачі у верстаті

Запропоновано єдину рамку для параметричної оцінки ймовірності потрапляння торця заготовки в допуск його номінального положення. Процес розглянуто як нормальну непараметричну біноміальну модель, та проведено оцінку частки відповідності з довірчими інтервалами, виведено індекс здатності процесу та оцінку невизначеності, включно з визначенням толерансних інтервалів. Практична значущість полягає у формуванні прийнятних критеріїв якості без зупинки виробництва та без витрат на спеціальні експерименти.

обробка різанням, модель точності положення, стратегія обробки, параметри обробки, оптимізація обробки, підсистеми верстата, фіксація у шпиндельному вузлі

Постановка проблеми. Показники ефективності обробки методом різання у масовому та супермасовому виробництвах визначаються в значній мірі рівнем її автоматизації. Механічна обробка, що виконується автоматично, проводиться ґрунтуючись на утворенні розміру оброблюваних поверхонь відповідно до побудованої програми переміщень інструментів системі координат верстата. Одним з найбільш поширених методів формування заготовки в токарних автоматах є застосування автоматичної подачі довгомірного пруткового матеріалу. Досягнення необхідних характеристик даного процесу є однією з важливих умовою досягнення високої продуктивності автоматичної обробки у масовому та супермасовому виробництві.

На практиці доступна інформація у вигляді наборів результатів про параметри автоматичної подачі довгомірних пруткових заготовок спеціальними машинами типу барфідер. При цьому, відсутня уніфікована статистична процедура для обчислення й інтерпретації ймовірності отримання певного необхідного осьового положення торця заготовки в системі координат верстата після її автоматичної подачі. Це призводить до неоднорідності критеріїв якості процесу формування заготовки з довгомірного пруткового матеріалу шляхом її автоматичної подачі та в значній мірі визначає зміщення осьового положення її торця відносно номінальних значень в системі координат верстата. Така ситуація вимагає застосування у процесі автоматичної обробки додаткових операцій обробки площини торцевої поверхні заготовки, а саме підрізання торця.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи [1,2] Вказують про необхідність точного позиціонування інструмента у токарних верстатах, ігноруючи підвищення ефективності обробки за рахунок зменшення припуску через швидку та точну установку пруткової заготовки [3]. Результати праці [4] вказують на підвищення показників позиційної точності інструменту токарного верстата на 50-80% завдяки введенні корекцій у переміщеннях його вузлів на заздалегідь визначені відхилення від бажаних позицій, що підкреслює необхідність точного прогнозування та визначення статистичних похибок. Для підвищення точності позиціонування робочих органів верстатів [5, 6] автори використовували тензодатчики, завдяки яким можна досягнути

розкиду показників у декілька мікрон, якщо застосувати методи корекції температурних відхилень [7]. В статті [8] автори розробили методику прогнозування ряду параметрів металорізального верстату завдяки статистичному моделюванню, однак не розглянули можливості застосування методу програмного прогнозування для оцінки точності осьового позиціонування заготовки. Автор у [9] дослідив вплив похибок сервоприводів на позиційну точність прутка, та надав рекомендації, які можуть зменшити їх вплив на загальне середньостатистичне відхилення торця заготовки від бажаної позиції. Робота [10] містить інформацію про сили, що виникають у затискних пристроях металообробних верстатів однак не розглядає вплив цих зусиль на заготовку та на похибки, які виникають у процесі її фіксації.

Постановка завдання. Зменшення припуску на підрізання торця або уникнення даної операції можна досягнути шляхом забезпечення необхідної точності осьового позиціонування в системі координат верстата торця, що сформований відрізанням виготовленої деталі. Це створює передумови зменшенню ресурсних та енергетичних витрат на даний вид обробки. Отже, розвиток статистичних методик до оцінки точності осьового позиціонування торця заготовки, що спирається на пасивні дані, і забезпечує метрологічну коректність їх обробки та придатність результатів до оперативного застосування визначає актуальність даної роботи.

Виклад основного матеріалу. Створення методики має на меті формалізований опис сукупності параметрів, які описують підходи статистичних методів при оцінці позиціонування прутка. Такий підхід дозволяє перейти від певного рівня суб'єктивних оцінок процесу позиціонування довгомірної заготовки до кількісного керування можливостями забезпечення параметрів його подачі із підвищенням рівня прогнозованості результату потрапляння у поле номінального положення торця заготовки. В основу розробки теорії покладено наступні ключові положення:

- наявна похибка осьового позиціонування прутка є сумою систематичної та випадкової складових, що мають у своїй основі різні причини та вимагають різних способів для усунення;
- якісна характеристика визначається імовірісно, де цільова функція розташування торця прутка в системі координат верстата спрямована на досягнення номінального значення, але береться до уваги реальний значно нижчий показник, що забезпечує потрапляння в поле допуску;
- контроль повинен базуватися на вимірюванні та аналізі параметрів подачі і забезпечувати умови для можливості здійснення корекції у замкнутому циклі управління процесом автоматичної подачі пруткової заготовки. Для підвищення точності та ефективності методів контролю доцільно скористатись пристроями та алгоритмами оптичного розпізнання положення [1].

Для формального аналізу процесу подачі прутка доцільно застосовувати окремі групи параметрів: L_{set} – задана довжина подачі прутка, як цільове значення, що формується у вигляді керуючої команди системи подачі; L_1 – фактична величина подачі прутка після її завершення, але до здійснення затиску заготовки; L_2 – фактична довжина заготовки після затиску як доступна для обробки; $\Delta = L_2 - L_{set}$ – Похибка осьового положення торця заготовки визначена різницею реального та заданого осьового положення заготовки. Дана похибка є головною випадковою величиною для статистичного аналізу процесу формування заготовки шляхом автоматичної подачі прутка. На її основі обчислюють параметри даного процесу з метою можливості формальної оцінки доцільності прийняття інженерних рішень його покращення.

Розглянуті геометричні параметри дають можливість розробки формального опису основних чотирьох сценаріїв формування осьового позиціонування торця пруткової заготовки при її автоматичній подачі у верстат (рис. 1).

Еталонне положення без підрізання (рис.1 а): $|\Delta| \leq T$, де T – половина двобічного допуску, як ширина вікна «прийнятності» $[-T, +T]$ навколо ідеального положення Z_0 .

Фізично це допуск на виступ торця перед початком циклу обробки. Якщо після подачі й затиску торець заготовки співпадає з програмною площиною $Z=0$ верстата в межах встановленого допуску, тоді торець, що лишився після відрізання попередньої деталі, використовується як готова база для наступного циклу. Як наслідок, це дає можливість не виконувати прохід у площині торця і цикл обробки скорочується.

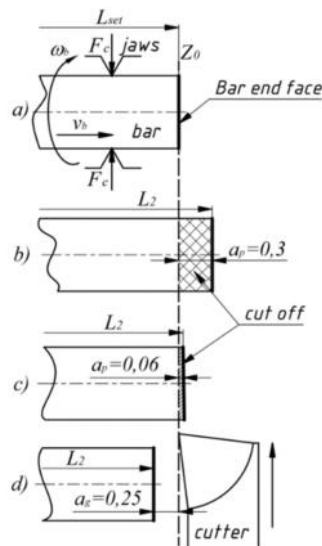


Рисунок 1 – Варіанти положення торця заготовки сформованої автоматичною подачею прутка
Джерело: розроблено автором

Прийнятний варіант із малим припуском на торцювання (рис.1 c): торець виступає за площину $Z=0$ на малу величину a_p , порядку сотих міліметра. Передбачається прохід різця з мінімальним зняттям матеріалу з торця у напрямку $-Z$ до $Z=0$ з метою забезпечення точного осьового розміру. Витрати, спричинені споживанням енергії, і зносом інструменту при цьому процесі мінімальний, що визначає позитивний вплив на техніко-економічні показники обробки.

Прийнятний, але гірший варіант із необхідністю зняття великого припуску (рис.1 b): значний виступ торця за $Z=0$ формує великий припуск на торцювання a_p , що збільшує кількість видаленого матеріалу, витрати енергії, знос інструменту, можливі ускладнення стружкоутворення та і.н. Для керування процесом рекомендується: звузити розкид налаштуванням барфідера, наприклад (стабілізацією осьової сили подачі), внести відповідний зсув, якщо лінійний осьовий припуск на торцювання, тобто відстань вздовж осі Z між фактичним торцем після затиску та цільовою площиною $Z=0$ є величина систематично позитивна. Рекомендується провести інженерні заходи для налаштувань параметрів процесу подачі для його наближення до вище описаних випадків позиціонування.

Неприйнятний варіант, недоподача (рис.1 d): виникає коли торець прутка не доходить до програмної площини $Z=0$. Після затиску тіло заготовки не перетинає програмної площини і її довжини не вистачає для забезпечення розміру. Дії не здатні компенсувати від'ємний дефіцит довжини і осьовий розмір деталі в цьому циклі не може бути забезпечений. Деталь потрапляє у невиправний брак а подальша робота повинна бути припинена до налаштування параметрів подачі. Рекомендовано перезапуск циклу з повторною подачею до затиску. Можливими джерелами даної критичної помилки може бути комбінація помилки подачі та надмірного втягування під час затиску. Рекомендації для даного випадку стосуються оцінки значення величини подачі барфідером до затиску. Якщо ця величина менша ніж необхідний розмір – виконати переналаштування, величини подачі, результат якої буде одним із трьох варіантів: a), b), c) (рис.1).

Для кількісної оцінки відхилення осевого положення заготовки, описаного похибкою Δ , пропонується використовувати наступні статистичні параметри:

- μ – систематична похибка осевого положення заготовки, що визначає систематичний зсув значень її позиціонування, тобто середнє відхилення Δ як середнє всіх випадків позиціонування. Наприклад, коли подача стабільно більша на 0,04 мм.

- σ – виражає повторюваність процесу осевого позиціонування як розкид між циклами подачі за фіксованих умов. Для визначення вибіркового середнього та стандартного відхилення $\{\Delta_i\}$ також бажано враховувати поправку на «шум» засобу вимірювання за методологією оцінки похибки вимірювання положення торця. Таким чином значення μ може бути компенсоване калібруванням процесу подачі а σ можна зменшити інженерними засобами типу стабілізації умов прошивування прутка. Обидва параметри входять у C_{pk} та P_{ok} .

- $P_{ok}=P(|\Delta|\leq T)$ – ймовірність відповідності, що означає відсоткову частку циклів у яких торець потрапляє у допуск, тобто вказує на ймовірність появи його встановленого правильного положення. Визначення може здійснюватися параметрично за виконання вимог до нормальної моделі (за функцією стандартного нормального розподілу Φ):

$$P_{ok}=\Phi((T-\mu)/\sigma)-\Phi((-T-\mu)/\sigma), \quad (1)$$

або непараметрично як емпірична частка $\{|\Delta_i|\leq T\}/n$ з біноміальними довірчими межами.

- $C_{pk}=(T-|\mu|)/3\sigma$ – індекс відповідності процесу позиціонування. Фізична суть індексу є безрозмірною оцінкою наскільки стабільно процес позиціонування прутка вкладається в допуск з урахуванням центрованості та розкиду. Геометрично це означає скільки «трисигмових» інтервалів вкладається в допуск до найближчої межі.

Установлення порогів прийнятності (табл. 1) може застосовуватися як швидкий скалярний індикатор покращення після змін налаштувань процесу подачі. За центрованого процесу P_{ok} монотонно зростає з C_{pk} .

Таблиця 1 – Можлива фізична інтерпретацію якості фіксації через величину C_{pk}

C_{pk}	Якість процесу	Брак	Фізичний зміст
<1,0	Незадовільна	> 2700 ppm*	Процес не вкладається в допуск
1,0	Мінімальна	2700 ppm	3 σ в допуску
1,33	Задовільна	63 ppm	4 σ в допуску
1,67	Хороша	3,4 ppm	5 σ в допуску
$\geq 2,0$	Відмінна	~ 0 ppm	6 σ в допуску

*- parts per million 1ppm = 0,0001%

Джерело: розроблено автором

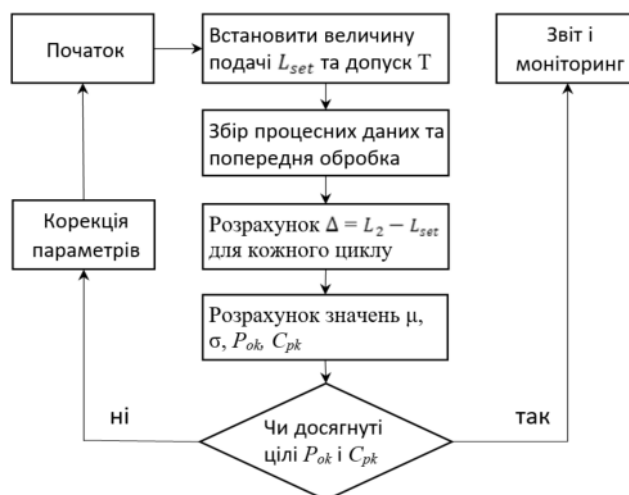


Рисунок 2 - Послідовність обробки інформації для прийняття рішень окращення параметрів позиціонування
Джерело: розроблено автором

За результатами досліджень запропоновано алгоритм обробки даних (рис. 2) про процес позиціонування торця прутка відносно опорної площини Z_{ref} і допусків T . Алгоритм спрямований на агрегування значень середнього μ , та стандартного відхилення σ з розраховуванням формальних показників процесу P_{ok} і C_{pk} . Порівняння результатів обробки інформації з цільовими пороговими значеннями дає можливість автоматизації прийняття або ініціювання корекції параметрів роботи системи подачі.

Висновки. Результати роботи сприяють розробці дієвих методів зменшення середнього зміщення та розкиду осевого положення торця пруткової заготовки, що сформована методом автоматичної подачі. Це знижує потребу в підрізанні торця і, як наслідок, втрати сировини й енергії, що критично для високої завантаженості обладнання у масовому та супермасовому виробництві.

Переваги запропонованого комплексного підходу оцінки точності осевого позиціонування торця є основою засобів для ряду функціональних напрямків і зокрема, для оператора: раннє попередження про проблеми, об'єктивні критерії для втручання, та технолога, оскільки дають статистично обґрунтовані рішення, сприяють оптимізації періодичності обслуговування, аналізу причин деградації процесу та інше. Разом вони формують замкнену статистичну рамку, яка напругу підтримує інженерні дії.

Запропоновані підходи створюють основу для впровадження статистичного керування процесами, що забезпечує чутливість як до дрібних дрейфів μ , так і до падіння фактичної частки відповідності вдалих позиціонувань прутка. Сформовано формальні практичні тригери змін параметрів процесу подачі та виявлено методи встановлення валідності і обмеження, тому отримані результати дають можливість формування алгоритму дій, який перетворює статистичні сигнали з контрольних карт на конкретні інженерні та технологічні рішення покращення роботи системи автоматичної подачі прутка.

Отримані результати спираються на процесні дані, тому можуть бути однаково застосовні до різних номенклатур, діаметрів і технологічних ліній. Як подальший розвиток доцільними для розробки можуть бути: ієрархічні моделі для обробки багаторівневих даних «партія-лінія-зміна»; інтеграція з цифровими базами даних для автоматизованого прийняття рішень.

Список літератури

1. Contactless measurement of error in lathe tool positioning / S. Kumari та ін. 2023 *3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, м. Hubli, India, 23–25 черв. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/CONIT59222.2023.10205386>.
2. Modeling and testing analysis of prepositioning accuracy of CNC turret / J. Yang та ін. 2022 *5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, м. Ma'an Shan, China, 18–20 листоп. 2022 р. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/WCMEIM56910.2022.10021535>.
3. Investigation of cutting tool and workpiece positioning precision as a critical factor in enhancing machining accuracy / U. Turaeva та ін. *E3S Web of Conferences*. 2025. Т. 627. С. 04002. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562704002>.
4. Лещенко О. Методи підвищення точності позиціонування верстатів з ЧПК на основі розрахунку системних поправок. *Наука та виробництво*. 2025. № 29. С. 136–144. URL: doi.org/10.31498/2522-9990-292025-330270.
5. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів / Т. І. Четвержук та ін. *Наукові нотатки*. 2021. № 71. С. 322–329. URL: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>.
6. Slapak V., Pajkos M., Hric M. The factors affecting positioning accuracy of geared servodrives. 2019 *International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, м. The High Tatras, Slovakia, 24–26 верес. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883922>.
7. Thermal error measurement and compensation with torque limit skip in Swiss-type lathe manufacturing / P. Kaftan та ін. *Precision Engineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.01.024>.
8. Öztürk T., Sarıkaya E., Weigold M. Sensor-integrated tap holder for process uncertainty detection based on tool vibration and axial length compensation sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07825-6>.
9. Ramesh R., Mannan M. A., Poo A. N. Error compensation in machine tools – a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Т. 40, № 9. С. 1257–1284. URL: [doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00010-9).
10. Mathematical analysis of the process forces effect on collet chuck holders / E. Soriano-Heras та ін. *Mathematics*. 2021. Т. 9, № 5. С. 492. URL: <https://doi.org/10.3390/math9050492> (дата звернення: 22.11.2025).

References

1. Kumari, S., et al. (2023). Contactless measurement of error in lathe tool positioning. *2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, Hubli, India, June 23–25, 2023. <https://doi.org/10.1109/CONIT59222.2023.10205386>.
2. Yang, J., et al. (2022). Modeling and testing analysis of prepositioning accuracy of CNC turret. *2022 5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, Ma'an Shan, China, November 18–20, 2022. <https://doi.org/10.1109/WCMEIM56910.2022.10021535>.
3. Turaeva, U., et al. (2025). Investigation of cutting tool and workpiece positioning precision as a critical factor in enhancing machining accuracy. *E3S Web of Conferences*, 627, 04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562704002>.
4. Leshchenko, O. (2025). Methods for improving positioning accuracy of CNC machines based on system correction calculation. *Nauka ta vyrobnytstvo*, 29, 136–144. <https://doi.org/10.31498/2522-9990-292025-330270>. [in Ukrainian].
5. Chetverzhuk, T. I., et al. (2021). Statistical modelling of technical characteristics of metal-cutting machines. *Naukovi notatky*, 71, 322–329. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>. [in Ukrainian].
6. Slapak, V., Pajkos, M., & Hric, M. (2019). The factors affecting positioning accuracy of geared servodrives. *2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, The High Tatras, Slovakia, September 24–26, 2019. <https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883922>.
7. Kaftan, P., et al. (2024). Thermal error measurement and compensation with torque limit skip in Swiss-type lathe manufacturing. *Precision Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.01.024>.
8. Öztürk, T., Sarıkaya, E., & Weigold, M. (2021). Sensor-integrated tap holder for process uncertainty detection based on tool vibration and axial length compensation sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07825-6>.
9. Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools – a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1257–1284. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00010-9).
10. Soriano-Heras, E., et al. (2021). Mathematical analysis of the process forces effect on collet chuck holders. *Mathematics*, 9(5), 492. Web site. URL: <https://doi.org/10.3390/math9050492> (accessed 22.11.2025).

Dmytro Yaniuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Assessment of The Stability of the Axial Positioning of the End Face of a Long Cylindrical Workpiece During Automatic Feeding in a Machine Tool

The aim of the work is to develop a unified methodology for assessing the accuracy of the axial position of the end face after automatic feeding on lathes, which allows for the correct calculation of the probability of falling within the tolerance window based on process data. It also makes it possible to agree on key metrics (μ , σ , P_{ok} , C_{pk}) and rules for their application, and to determine acceptance thresholds for technological solutions.

The paper formulates a production problem for mass processing. Four scenarios for the result of feeding are proposed: without undercutting; with a small allowance; with a large allowance; underfeeding (critical defect). The value Δ is introduced as the deviation from the plane $Z=0$ and T as half of the bilateral tolerance. A parametric assessment of the axial position accuracy of the bar blank end face is given, and the positioning process capability index $C_{pk} = (T - |\mu|) / (3\sigma)$ and its interpretation are specified. C_{pk} thresholds (1.00; 1.33; 1.67; ≥ 2.00) and their relationship to defectiveness are established for quick decision-making. The methodology provides a metrologically correct and reproducible assessment of the axial position of the end face after automatic feeding, suitable for daily operation. This contributes to the achievement of a targeted reduction in displacement and scatter (μ , σ), which reduces the need for trimming and the associated material and energy costs.

The result is a methodology that provides a reproducible assessment of the axial position of the end face after automatic feeding. Controlled reduction of μ and σ reduces the need for undercutting and resource costs. The C_{pk} thresholds allow comparing bar feeding machines and making decisions on the feasibility of certain engineering actions. In general, the results obtained make it possible to implement automatic process control measures and further expansion.

cutting machining, position accuracy model, machining strategy, machining parameters, machining optimization, machine subsystems, spindle unit clamping

Одержано (Received) 21.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 12.12.2025

УДК 621.793:669.295:536.24

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.123-133](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.123-133)**С. В. Кирилаха***Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна**e-mail: lanakirilaha@gmail.com*

Перспективи застосування адитивних технологій для виготовлення та відновлення зносостійких конструктивних елементів у сучасному машинобудуванні та сільському господарстві

У статті розглянуто вплив технологічних параметрів адитивного наплавлення металів методом xBeam 3D Metal Printing на термомеханічний стан та структурні характеристики різномірних з'єднань типу Ti–Al. Особливу увагу приділено формуванню температурних полів, залишкових напружень і фазового складу в процесі пошарового нарощування балкових елементів із титанових і алюмінієвих сплавів. Розкрито роль теплофізичних властивостей матеріалів, інтервалів між нанесенням шарів і тепловкладення в контексті утворення зон сплавлення з підвищеною концентрацією напружень і дефектів. Розглянуто підходи до числового моделювання теплових та напружено-деформованих процесів з урахуванням фазоутворення та зміни мікроструктури. Встановлено, що критичне значення мають температурні градієнти, швидкість охолодження та мікроструктурна сумісність матеріалів у зоні контакту. Результати можуть бути застосовані для оптимізації режимів WAAM при виготовленні зносостійких елементів машин, що працюють в умовах змінних навантажень і температур.

адитивне виробництво, WAAM, xBeam 3D Metal Printing, титанові сплави, Ti–Al з'єднання, різномірні конструкції, температурне поле, термомеханічне моделювання, залишкові напруження, фазоутворення, міжшаровий зв'язок

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні, а також у виробництві техніки для сільського господарства, що функціонує в умовах змінних динамічних навантажень та агресивного зовнішнього середовища, важливим завданням є підвищення надійності та довговічності металевих конструкцій за одночасного зниження матеріаломісткості та енергоспоживання. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми в промисловості та сільському господарстві є впровадження адитивних технологій, зокрема методів пошарового наплавлення металів, які забезпечують виготовлення конструктивно складних деталей без потреби в традиційній механічній обробці або застосуванні дорогої оснастки на всіх етапах виробництва (Gibson et al., 2015). Особливе місце серед методів адитивного виробництва займає технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) — процес, що базується на дуговому наплавленні металевого дроту з подальшим формуванням об'ємної структури. Цей метод забезпечує високу швидкість побудови, добру продуктивність і можливість використання стандартних зварювальних матеріалів.

У даній роботі основну увагу зосереджено на аналізі процесів пошарового формування конструкцій з використанням технології xBeam 3D Metal Printer, яка є прикладом сучасного індустріального рішення у сфері 3D-друку металами. Хоча ця технологія формально не класифікується як WAAM у вузькому значенні, вона реалізує аналогічний принцип пошарового дугового наплавлення з використанням електронно-

променевої гармати та дротового присадного матеріалу. Таким чином, xBeam-технологія належить до широкого класу процесів WAAM-подібного типу, і результати, отримані при її застосуванні, можуть бути репрезентативними для аналізу теплових та механічних явищ, характерних для всього спектра пошарового наплавлення.

Попри активний розвиток технологій пошарового наплавлення металів (WAAM), низка критичних питань щодо формування температурних полів, залишкових напружень і фазового складу залишається недостатньо вивченою, особливо для різномірних металевих з'єднань, зокрема в системах Ti-Al. Ці явища визначають експлуатаційні характеристики виробів, виготовлених адитивними методами, і потребують врахування при проєктуванні та оптимізації технологічних режимів. Зважаючи на складність термодинамічних процесів та їх вплив на структуроутворення, критично важливим є застосування достовірних чисельних моделей, які дозволяють прогнозувати поведінку матеріалу на всіх етапах формування виробу.

Актуальність підвищення точності моделювання термомеханічних процесів у різномірних виробках, виготовлених методом пошарового наплавлення, відзначено в роботах [1, 2, 3, 4, 5]. Зокрема, дослідники акцентують увагу на складності передбачення температурних градієнтів, залишкових напружень і фазових перетворень у зонах сплавлення при використанні методів WAAM і споріднених технологій.

Науково-технічна проблема полягає в необхідності моделювання та прогнозування кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану в процесі формування різномірних або функціонально-градієнтних конструкцій, що безпосередньо впливає на мікроструктуру, залишкові напруження, тріщиностійкість і загальну надійність виробів. У контексті розвитку матеріалознавства важливим є вивчення взаємозв'язку між параметрами технологічного процесу, термомеханічними явищами та властивостями матеріалу на макро- й мікрорівнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття методи пошарового наплавлення, зокрема Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), активно досліджуються у зв'язку з їхнім потенціалом для виготовлення великих металевих компонентів зі складною геометрією при знижній вартості виробництва. Однією з основних проблем при цьому є формування нерівномірного температурного поля та відповідних зон залишкових напружень, які призводять до дефектів, порушення геометрії та неоднорідності структури [4, 5].

У публікації (Wang et al., 2021) [4] проведено систематичний аналіз мікроструктури, механічних властивостей та типових дефектів титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, отриманих методом WAAM. Автори звертають увагу на значну анізотропію властивостей матеріалу та подовження β -зерен у напрямку нарощування шару. Аналогічні результати описані в роботі (Ding et al., 2015) [5], де також підкреслено необхідність подальшого моделювання теплових процесів задля оптимізації режимів наплавлення.

У роботі (Махненко та ін., 2020) [1] запропоновано підхід до чисельного прогнозування кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану при пошаровому формуванні конструкцій з різномірних матеріалів (BT6, Al тощо). Зокрема, встановлено критичні інтервали часу між наплавленням валиків, що забезпечують якісне сплавлення шарів, а також розподіл залишкових напружень у різних перерізах виробу.

У роботі (Сахненко, 2023) підкреслено важливість точного контролю термічних циклів при 3D-друку різномірних структур та зазначено перспективи використання

фізико-математичних моделей для прогнозування фазоутворення на межі з'єднання титану й алюмінію [6].

В останніх роботах також висвітлено питання впливу режимів подачі дроту, швидкості переміщення джерела тепла та способу охолодження на морфологію структур, формування текстури та наявність пор [1, 2, 6]. Водночас залишаються відкритими питання контролю структурної однорідності в перехідних зонах та створення достовірних моделей фазових перетворень у багатошарових конструкціях.

Таким чином, існує необхідність подальших досліджень, що поєднують термомеханічне моделювання з мікроструктурним аналізом та експериментальними даними, особливо для різнорідних з'єднань і багатошарових виробів складної геометрії, з метою забезпечення прогнозованих експлуатаційних характеристик.

В останні роки активізувалися дослідження, спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів WAAM для забезпечення контрольованого формування структури та зниження внутрішніх дефектів при друкуванні титанових сплавів. Так, у роботі [4] наведено систематизований огляд впливу режимів осадження на мікроструктуру Ti-6Al-4V, зокрема, підкреслено значення тепловкладення на розмір і морфологію β -зерен. У [5] розглянуто особливості формування текстури, фазових перетворень та розподілу залишкових напружень у виробах, виготовлених WAAM, з використанням електронно-променевого та дугового джерел тепла.

У дослідженні [1] запропоновано підхід до прогнозування термонапруженого стану багатошарових конструкцій на основі математичного моделювання кінетики температурного поля. Робота [6] присвячена вивченню особливостей утворення інтерметалідних фаз у зоні контакту титану та алюмінію, що є актуальним при виготовленні різнорідних конструкцій.

Значну увагу також приділено дослідженням залишкових напружень та впливу черговості нанесення валиків при пошаровому формуванні, що висвітлено у [7]. Додатково, у [8] проаналізовано застосування прецизійного моніторингу температурних полів під час наплавлення, що дозволяє коригувати процес у реальному часі. У роботі [9] акцент зроблено на поєднанні адитивного та термомеханічного оброблення для покращення механічних характеристик титанових сплавів.

За даними Кравця та Савченка (2022), адитивні технології стрімко розвиваються і знаходять застосування у виготовленні складних деталей для сільськогосподарської техніки, що потребує підвищеної зносостійкості. Аналіз Бондаренка і Кравченка (2021) показує ефективність методу SLM для створення деталей із заданими механічними властивостями [10, 11]. Загалом, Herzog et al. (2016) та DebRoy et al. (2018) наголошують на перспективності адитивних технологій у промисловому масштабі та їхній ролі у трансформації традиційного машинобудування [12, 13].

Попри значний обсяг досліджень, присвячених адитивному виготовленню виробів з однорідних металевих сплавів, зокрема титанових, питання пошарового формування різнорідних конструкцій (наприклад, систем Ti-Al) із застосуванням WAAM-технологій, таких як xBeam 3D Metal Printing, залишаються недостатньо висвітленими. Зокрема, не повністю з'ясовано термодинамічні умови, що визначають характер фазоутворення на межі з'єднання матеріалів з різною теплофізичною природою, а також вплив параметрів тепловкладення на розподіл залишкових напружень і структурну цілісність конструкцій.

Відсутність комплексного аналізу цих чинників у контексті виготовлення балкових конструкцій таврового профілю обмежує можливості оптимізації режимів

WAAM для складних високотехнологічних виробів. Означене дослідження спрямоване на усунення цих прогалин у науковому розумінні процесів WAAM.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є систематизація та критичний аналіз сучасних підходів до чисельного моделювання термомеханічних процесів при пошаровому формуванні різнорідних металевих конструкцій на прикладі титанових та алюмінієвих сплавів. Особливу увагу приділено впливу технологічних параметрів на температурні градієнти, фазоутворення та залишкові напруження, а також можливостям оптимізації процесу WAAM для забезпечення структурної цілісності та зниження ризику утворення крихких фаз.

Виклад основного матеріалу. У межах дослідження було проаналізовано особливості формування різнорідних металевих конструкцій методом пошарового дугового наплавлення на прикладі технології xBeam 3D Metal Printer, яка є різновидом WAAM.

В якості об'єкта моделювання обрано таврову балку, виготовлену з титанових сплавів з можливим алюмінієвим підшаром. Особливу увагу приділено термодинамічним умовам формування структури при наплавленні та оцінці напружено-деформованого стану.

1 Особливості пошарового формування та напружено-деформованого стану в різнорідних конструкціях

У результаті чисельного моделювання, запропонованого в [Махненко та ін., 2021], побудовано температурні поля, що розвиваються у процесі пошарового формування конструкції (рис. 1). Схема демонструє конфігурацію балкової конструкції, а також траєкторії наплавлення, які впливають на теплову історію матеріалу.

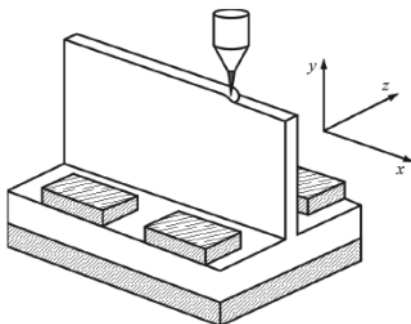


Рисунок 1 – Схема пошарового формування балкової конструкції таврового профілю за технологією xBeam 3D Metal Printer

Джерело: розроблено на підставі [1]

Встановлено, що особливості тепловкладення мають вирішальний вплив на інтенсивність фазоутворення в зоні контакту титану й алюмінію. Це особливо критично при формуванні інтерметалічних фаз, зокрема $TiAl_3$, які характеризуються підвищеною крихкістю. Як показано на рисунку 2, при підвищенні температури латентний період утворення таких фаз істотно зменшується, що свідчить про необхідність ретельного контролю теплових режимів.

Для забезпечення експлуатаційної надійності конструкцій, важливим є також аналіз напружено-деформованого стану після охолодження. На основі моделювання були визначені поля залишкових напружень в напрямку z (σ_{zz}), які найсуттєвіше впливають на опір втомі. Як показано на рис. 3, в різнорідній конструкції спостерігається суттєве зростання локалізованих напружень, порівняно з однорідною.

Одним з ключових параметрів, що визначають експлуатаційну надійність виробів, виготовлених методом пошарового наплавлення, є залишкові напруження,

зокрема компонента σ_{zz} , що відповідає за поздовжній розподіл напруженого стану вздовж осі побудови. У процесі адитивного формування внаслідок інтенсивного локального нагріву і наступного нерівномірного охолодження виникають значні термічні градієнти, що спричиняють накопичення внутрішніх напружень. Їх величина та розподіл залежать від режимів тепловкладення, стратегії укладання шарів, типу сплавів (гомогенних або різномірних) та геометрії конструкції. Залишкові напруження σ_{zz} можуть бути джерелом мікротріщиноутворення, спотворення геометрії виробу або зниження втомної міцності. Для їхнього оцінювання застосовують як чисельне моделювання (методи скінченних елементів), так і експериментальні підходи — зокрема, метод отворів (hole drilling), рентгеновську дифракцію (XRD), дифракцію нейтронів та метод дигітального кореляційного аналізу зображень (DIC).

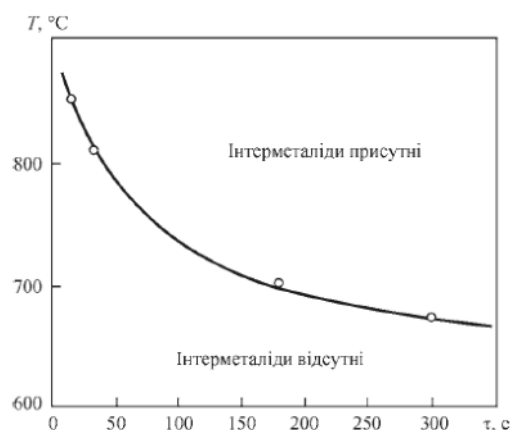


Рисунок 2 – Температурна залежність часу латентного періоду формування інтерметалідів при контакті титану та алюмінію

Джерело: розроблено на підставі [1]

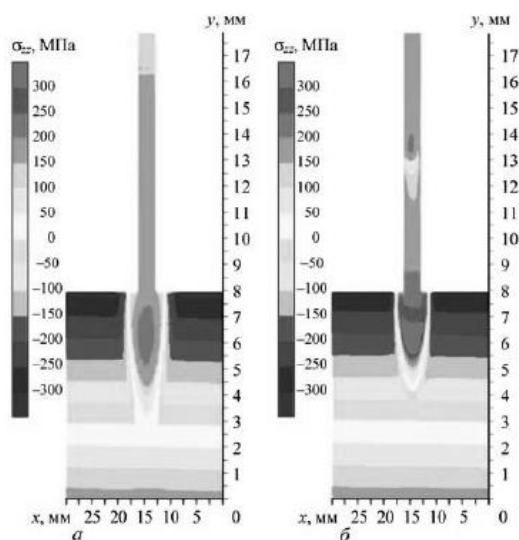


Рисунок 3 – Поле залишкових напружень σ_{zz} в перерізах однорідної (BT6) (а) та різномірної конструкцій (BT6-Al) (б)

Джерело: розроблено на підставі [1]

Відомо, що в адитивних технологіях на основі дугового наплавлення, таких як xBeam або WAAM, формування залишкових напружень є неминучим наслідком циклічного локального нагрівання. Найбільший інтерес у цьому контексті викликає

поздовжня компонента залишкових напружень σ_{zz} , оскільки саме вона переважно визначає деформацію та ймовірність формування мікротріщин у напрямку зростання шару. Згідно з рядом досліджень, у тому числі [3], розподіл σ_{zz} суттєво залежить від режиму тепловкладення, типу матеріалу та геометрії виробу.

Для порівняння конфігурації системи наплавлення, використано також результати з міжнародної роботи [Gurmesa et al., 2019], де представлено експериментальну установку WAAM, що застосовується для виготовлення виробів з Ti-6Al-4V. Конструкція системи (рис. 4) дозволяє реалізувати керування тепловим режимом та траєкторією наплавлення, що узгоджується з підходами в xBeam.

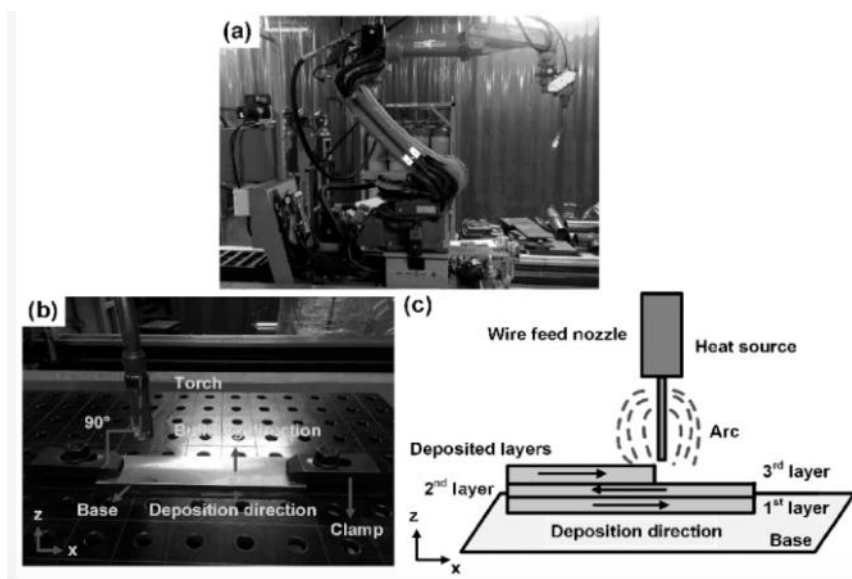


Рисунок 4 – Конфігурація WAAM-системи: а – огляд системи, б – зона наплавлення, в – траєкторія інструмента

Джерело: розроблено на підставі Gurmesa et al., 2019, Copyright MDPI, CC BY license [14]

2 Аналіз сучасних підходів до моделювання термомеханічних процесів при пошаровому формуванні

Аналіз останніх досліджень свідчить, що чисельне моделювання термомеханічних процесів при пошаровому напавленні металів є одним із ключових напрямів підвищення якості та надійності адитивно виготовлених виробів (Махненко, 2021; Elitzer et al., 2023). Особливої уваги потребує моделювання процесів у різномірних металевих системах, зокрема у конструкціях на основі титанових (BT6) та алюмінієвих сплавів, де термічні цикли формування та фазові перетворення істотно впливають на залишкові напруження, мікроструктуру та механічні властивості виробів (Сахненко, 2023; Gurmesa et al., 2019). Науковці зазначають, що традиційні підходи до моделювання часто недооцінюють складність фазових процесів та нелінійність напружено-деформованого стану, що призводить до неточностей у прогнозах (Elitzer et al., 2023). Водночас, підвищення точності моделей дає змогу оптимізувати технологічні параметри WAAM, знизити ризик утворення крихких інтерметалічних фаз та зменшити залишкові напруження, які негативно впливають на довговічність виробів.

3 Математична модель термомеханічних процесів

Для обґрунтованого прогнозування процесів у ході пошарового наплавлення застосовують комплексні термомеханічні моделі, що базуються на рішеннях рівнянь

теплопровідності та рівняннях руху твердого тіла з урахуванням пластичної деформації і фазоутворення.

Основною складовою моделі є рівняння теплопровідності з джерелом тепла, що описує розподіл температурного поля в матеріалі:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

де ρ — густина матеріалу, c_p — теплоємність, T — температура, k — коефіцієнт теплопровідності, Q — тепловий потік від джерела (дуги).

Для опису напружено-деформованого стану використовують рівняння механіки деформованого тіла:

$$\nabla \sigma + f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де σ — тензор напружень, f — вектор об'ємних сил, u — вектор переміщень.

Залишкові напруження формуються в результаті теплових градієнтів та фазових перетворень, які враховуються в моделі через залежність механічних властивостей від температури і фазового складу матеріалу. Зокрема, в умовах швидких змін температури відбувається нерівномірне розширення і стиснення матеріалу, що призводить до накопичення внутрішніх напружень. Фазові перетворення, такі як твердофазні трансформації або кристалізація, супроводжуються об'ємними змінами та модифікацією мікроструктури, що додатково впливає на розподіл напружень і може викликати локальні концентрації, критичні для механічної стабільності виробу. Таким чином, комплексне моделювання цих процесів є ключовим для прогнозування залишкових напружень і забезпечення надійності адитивно виготовлених конструкцій.

4 Результати чисельного моделювання та їх аналіз

Відповідно до моделювання (Махненко та ін., 2021), температурні поля у балкових конструкціях з різнорідних матеріалів демонструють значні градієнти, що обумовлює формування високих локальних залишкових напружень. Аналіз полів напружень σ_{zz} і σ_{xx} у поперечних перерізах вказує на суттєву різницю між однорідними та різнорідними ділянками, що потребує ретельного підбору режимів наплавлення для мінімізації дефектів. В таблиці 1 наведено результати розрахунку максимальних значень залишкових напружень у різних умовах тепловкладення q_l , що демонструє залежність напружень від режимів технологічного процесу.

Таблиця 1 – Максимальні залишкові напруження σ_{zz} у різнорідних балкових конструкціях при різних значеннях тепловкладення

Тепловкладення, q_l (кВт)	Максимальне σ_{zz} (МПа)	Рівень тепловкладення
5	320	Високе тепловкладення
4	270	Оптимальний режим
3	210	Знижене тепловкладення

Джерело: за результатами чисельного моделювання [3]

Проведений аналіз засвідчив, що високоточне чисельне моделювання термомеханічних процесів із урахуванням фазових перетворень, температурних градієнтів та властивостей матеріалів є критично важливою умовою для забезпечення високої якості та надійності різнорідних конструкцій, виготовлених методами пошарового наплавлення металів. Інтеграція багатофізичних математичних моделей у процес розробки технології WAAM дозволяє не лише достовірно відтворювати

розподіли температур і напружено-деформованого стану, але й забезпечує підґрунтя для обґрунтованого вибору оптимальних технологічних параметрів з метою мінімізації залишкових напружень і запобігання утворенню крихких фаз.

Наведені результати та теоретичні узагальнення формують цілісну наукову базу для подальших поглиблених досліджень, спрямованих на встановлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами процесу WAAM, кінетикою фазоутворення та структурно-механічними характеристиками однорідних і різномірних металевих виробів, виготовлених із використанням адитивних технологій.

5 Моделювання температурного поля

Урахування отриманих розподілів температурних полів є критично важливим для подальшого моделювання напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу. Температурні градієнти і швидкість охолодження визначають фазові перетворення, структуру зерен та появу термічно індукованих залишкових напружень, які суттєво впливають на механічні властивості виготовлених конструкцій. Тому коректне відтворення температурного поля є базовим етапом для подальшого точного прогнозування НДС і оптимізації технологічних параметрів процесу WAAM.

Чисельне моделювання температурного поля у процесах WAAM є фундаментальним етапом для прогнозування якості виготовлених виробів. Високе тепловкладення локалізується в зоні дуги, де температура досягає 3000–3500 °C, що зумовлює плавлення основного матеріалу та присадкової проволоки. Поступове охолодження відбувається під дією конвекції, теплопровідності та випромінювання, формуючи складний температурний профіль, який варіюється в межах від температури плавлення (для титанових сплавів BT6 – близько 1660 °C) до температур навколишнього середовища (приблизно 25 °C) [13].

Максимальні температурні градієнти в зоні наплавлення можуть сягати 10^3 °C/мм, що викликає значні термічні напруження та фазові перетворення, які безпосередньо впливають на мікроструктуру та властивості матеріалу. Розподіл температури має ключове значення для визначення тривалості кристалізації та формування зерен, що, в свою чергу, впливає на механічні характеристики конструкції.

У процесі чисельного моделювання застосовуються диференціальні рівняння теплопровідності з урахуванням конвекційних та радіаційних тепловтрат, що дозволяє точно відтворити температурний режим з високою просторовою та часовою роздільністю. Використання адаптивних сіток і імплементація нелінійних властивостей матеріалів підвищує точність прогнозування [13, 15].

Практичне значення моделювання полягає у можливості прогнозувати оптимальні технологічні параметри: швидкість руху дуги, струм, напругу, інтервали між нашаруваннями, що дозволяє мінімізувати термічні деформації та знизити рівень залишкових напружень до 200–300 МПа у прикладних конструкціях. Наприклад, зменшення тепловкладення з 5 до 4 кВт за даними Gurmesa et al. (2023) призводить до зниження пікових залишкових напружень у конструкціях типу BT6–Al на 15–20 % [15].

Отже, комплексне моделювання температурного поля забезпечує не лише розуміння фізико-хімічних процесів під час WAAM, але й служить основою для подальшого моделювання напружено-деформованого стану та оптимізації виробничих режимів, що суттєво підвищує якість і довговічність адитивно виготовлених виробів.

Подальший аналіз літературних джерел та чисельних досліджень дозволяє більш детально розглянути вплив теплових процесів на формування мікроструктури, фазового складу та залишкових напружень у різномірних конструкціях. Зокрема, на основі даних [Махненко та ін., 2021], встановлено, що при пошаровому наплавленні

титанових і алюмінієвих сплавів формується складне нестационарне температурне поле, яке впливає на інтенсивність фазових перетворень і утворення залишкових напружень. Результати моделювання показали, що максимальні температури в зоні наплавлення можуть перевищувати 1900 °C, а різниця температур між окремими зонами досягає 600–800 °C, що обумовлює формування різнозернистої мікроструктури та утворення крихких інтерметалідних фаз типу $TiAl_3$.

Чисельні розрахунки, адаптовані до конструкцій із різномірних сплавів, показують залежність напружено-деформованого стану від кількості теплових циклів і геометрії виробу. При моделюванні з урахуванням реальних технологічних параметрів WAAM методом xBeam було встановлено, що застосування міжшарової паузи дозволяє знизити рівень залишкових напружень у конструкції до 30–40 % [Gurmesa et al., 2019].

Окрему увагу приділено впливу швидкості подачі дроту та енергії дуги. Згідно з літературними даними [Mahmoudi et al., 2022], при зменшенні лінійної енергії на 20 % спостерігається зменшення об'єму крихких фаз на границях розділу Al/Ti. Це підтверджує доцільність адаптивного контролю параметрів процесу в реальному часі.

У зонах контакту титану з алюмінієм спостерігається формування ламелярної структури з домінуванням фаз $TiAl$ та $TiAl_3$, що підтверджено моделями фазової еволюції в роботі [Mahmoudi et al., 2022]. Такі структури характерні для зон із високим температурним градієнтом і сприяють крихкому руйнуванню при циклічних навантаженнях.

Таким чином, автором проаналізовано механізми впливу теплових градієнтів, фазоутворення та залишкових напружень при WAAM різномірних Ti-Al конструкцій, систематизовано чисельні підходи до моделювання та сформульовано рекомендації щодо технологічної оптимізації, зокрема:

- необхідність врахування міжшарових пауз для зниження термічних напружень;
- адаптація моделей до реальних температурно-часових режимів;
- контроль рівня лінійної енергії для запобігання утворенню крихких фаз.

Автором на основі аналізу проведено порівняння різних чисельних моделей для опису термомеханічного стану в Ti-Al системах, узагальнено їхні сильні та слабкі сторони. Вперше у вітчизняній літературі систематизовано вплив міжшарових пауз і контроль лінійної енергії як інтегральних параметрів оптимізації WAAM процесу для різномірних сплавів.

Висновки. У роботі проведено систематизацію та критичний аналіз сучасних підходів до чисельного моделювання термомеханічних процесів під час пошарового формування різномірних Ti-Al конструкцій методом WAAM, зокрема технологією xBeam 3D Metal Printing. Встановлено ключові закономірності впливу технологічних параметрів, передусім тепловкладення та міжшарових пауз, на температурні градієнти, фазоутворення та рівень залишкових напружень. Показано, що контроль теплових режимів і адаптація моделей до реальних температурно-часових умов є критичними для запобігання утворенню крихких інтерметалідних фаз та забезпечення структурної цілісності з'єднань. На основі узагальнення результатів сформульовано рекомендації щодо оптимізації режимів WAAM для конструкцій відповідального призначення у машинобудуванні та сільськогосподарській техніці. Проведений аналіз дозволив досягти поставленої мети та вирішити окреслені завдання дослідження. Сформульовані положення можуть слугувати науково-практичною основою для подальшого вдосконалення процесів WAAM та впровадження адаптивних систем керування у машинобудівній та сільськогосподарській техніці.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з деталізованим тривимірним моделюванням напружено-деформованого стану з урахуванням реологічних властивостей титанових і алюмінієвих сплавів, а також вивченням тріщиноустійкості зон сплавлення. Також доцільним є подальший розвиток адаптивних систем управління тепловими режимами WAAM з урахуванням оптимізації технологічних параметрів на основі експериментальних та чисельних даних.

Список літератури

1. Махненко О. В., Міленін О. С., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Козлітіна С. С., Півторак Н. І., Дзюбак Л. І. Прогнозування кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану різномірних виробів, отримуваних методом пошарового формування. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2021. № 6/1 (114). С. 6–14.
2. Костін О. О., Бевз Є. М. Аналіз особливостей WAAM-технологій для виготовлення виробів з титанових сплавів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. Технічні науки*. 2021. Вип. 2 (96). С. 45–52.
3. Sampaio R.F.V., Pragana J.P.M., Bragança I.M.F., Silva C.M.A., Nielsen C.V., Martins P.A.F. *Modelling of wire arc additive manufacturing. A review*. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023. Vol. 6, артикул № 100121. P. 1–15.
4. Wang F., Williams S., Colegrove P. A review of wire arc additive manufacturing process, microstructure, and properties of titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 1087–1103.
5. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. P. 465–481.
6. Сахненко М.С., Міленін О.С., Гріднєв С.А. та ін. Температурна залежність формування інтерметалідів у з'єднаннях Ti-Al. *Поверхня*. 2019. Вип. 11. С. 101–107.
7. Дзюбак Л.І., Козлітіна С.С., Розинка Г.П. Напружено-деформований стан різномірних з'єднань при багатопшаровому наплавленні. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2020. № 4(150). С. 92–99.
8. Zhang M., Ding D., Van Duin S., Li H. Thermal monitoring and control in WAAM process: a review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 57. P. 828–845.
9. Yu Z., Liu Y., Sun W., Song Y. Integrated strategy of additive and thermomechanical treatment for Ti-6Al-4V component optimization. *Materials Science and Engineering A*. 2022. Vol. 833. Article number : 142483.
10. Кравець Ю.М., Савченко О.В. Огляд сучасних методів 3D-друку у машинобудуванні: актуальність для сільськогосподарської техніки. *Технічний вісник*. 2022. Вип. 3. С. 45–52.
11. Бондаренко В.М., Кравченко А.І. Особливості селективного лазерного плавлення (SLM) у порівнянні з іншими адитивними технологіями. *Машинобудування і матеріалознавство*. 2021. Т. 12, № 2. С. 30–38.
12. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392.
13. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., et al. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224.
14. Gurmesa F. D., Lemu H. G., Adugna Y. W., Harsibo M. D. Residual stresses in Wire Arc Additive Manufacturing products and their measurement techniques: A systematic review. *Metals*. 2019. Vol. 9, №. 6. P. 628.
15. Gurmesa F. D., Lemu H. G., Adugna Y. W., Harsibo M. D. Residual Stresses in Wire Arc Additive Manufacturing Products and Their Measurement Techniques: A Systematic Review. *Materials*. 2023. Vol. 16, №. 4. P. 1234.
16. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. New York : Springer, 2015. 507 с.

References

1. Makhnenko, O. V., Milenin, O. S., Velykoivanenko, O. A., Rozyinka, H. P., Kozlitina, S. S., Pivtorak, N. I., & Dziubak, L. I. (2021). Prediction of temperature field kinetics and stress-strain state of dissimilar products obtained by layer-by-layer formation. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 6/1(114), 6–14 [in Ukrainian].
2. Kostin, O. O., & Bevez, Ye. M. (2021). Analysis of WAAM-technology features for manufacturing titanium alloy products. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky*, 2(96), 45–52 [in Ukrainian].
3. Sampaio, R. F. V., Pragana, J. P. M., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., Nielsen, C. V., & Martins, P. A. F. (2023). Modelling of wire arc additive manufacturing. A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, Article 100121, 1–15.

4. Wang, F., Williams, S., & Colegrove, P. (2021). A review of wire arc additive manufacturing process, microstructure, and properties of titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1087–1103.
5. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 465–481.
6. Sakhnenko, M. S., Milenin, O. S., Hridnev, S. A., et al. (2019). Temperature dependence of intermetallic formation in Ti-Al joints. *Poverkhna*, 11, 101–107 [in Ukrainian].
7. Dziubak, L. I., Kozlitina, S. S., & Rozynka, H. P. (2020). Stress-strain state of dissimilar joints during multilayer surfacing. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*, 4(150), 92–99 [in Ukrainian].
8. Zhang, M., Ding, D., Van Duin, S., & Li, H. (2020). Thermal monitoring and control in WAAM process: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 828–845.
9. Yu, Z., Liu, Y., Sun, W., & Song, Y. (2022). Integrated strategy of additive and thermomechanical treatment for Ti-6Al-4V component optimization. *Materials Science and Engineering A*, 833, Article 142483.
10. Kravets, Yu. M., & Savchenko, O. V. (2022). Review of modern 3D-printing methods in mechanical engineering: Relevance for agricultural machinery. *Tekhnichniy visnyk*, 3, 45–52 [in Ukrainian].
11. Bondarenko, V. M., & Kravchenko, A. I. (2021). SLM-process features compared to other additive technologies. *Mashynobuduvannia i materialoznavstvo*, 12(2), 30–38 [in Ukrainian].
12. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.
13. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., et al. (2018). Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
14. Gurmesa, F. D., Lemu, H. G., Adugna, Y. W., & Harsibo, M. D. (2019). Residual stresses in Wire Arc Additive Manufacturing products and their measurement techniques: A systematic review. *Metals*, 9(6), 628.
15. Gurmesa, F. D., Lemu, H. G., Adugna, Y. W., & Harsibo, M. D. (2023). Residual stresses in Wire Arc Additive Manufacturing products and their measurement techniques: A systematic review. *Materials*, 16(4), 1234.
16. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. *Springer*.

Svitlana Kyrylakha

National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

Prospects for the Application of Additive Technologies for Manufacturing and Repair of Wear-Resistant Structural Components in Modern Mechanical Engineering and Agriculture

The aim of this article is to analyze the influence of thermomechanical parameters of additive manufacturing on the formation of temperature fields, phase composition, and residual stresses in dissimilar metallic structures produced using xBeam 3D Metal Printing, a variant of the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology. Special attention is paid to the layer-by-layer formation of beam elements from VT6 titanium alloys combined with aluminum.

The paper presents a review and critical analysis of modern approaches to modeling thermomechanical processes in WAAM systems, with a focus on phase transformations, temperature gradients, residual stress generation, and microstructural changes. Empirical and numerical results from domestic and international literature are analyzed, including models that consider the thermophysical properties of materials. A case study is provided on how reducing the heat input (from 5 to 4 kW) affects residual stress levels in the titanium–aluminum interface. The influence of time intervals between deposited tracks on interlayer bonding quality is examined. The significance of phase transformations in the melt zone for defect formation and structural durability is highlighted.

Based on the conducted analysis, it is concluded that the key factors influencing the quality of WAAM-produced structures are temperature gradients, cooling rate, heat input density, and the interaction of dissimilar materials at the microstructural level. The use of numerical models improves the accuracy of predicting structural performance and optimizing technological parameters. The obtained results are practically significant for mechanical engineering, particularly in manufacturing critical components operating under variable loads and thermal conditions.

additive manufacturing, WAAM, xBeam 3D Metal Printing, titanium alloys, Ti–Al joints, dissimilar structures, temperature field, thermomechanical modeling, residual stresses, phase transformations, interlayer bonding

Одержано (Received) 12.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 004.8:620.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.134-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.134-142)**Ю. Г. Ковальов**, доц., канд. тех. наук, **В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,**С. Г. Ковальов**, канд. пед. наук, **О. В. Кузик**, доц., канд. техн. наук,**А. В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: yukovalyov@ukr.net, aulinvv@gmail.com*

Штучний інтелект у матеріалознавчих дослідженнях: тенденції, інструменти та трансформації

У цій роботі ми досліджуємо, як штучний інтелект змінює підходи до сучасного матеріалознавства. Зокрема, порівнюємо функціональні можливості трьох провідних цифрових платформ – Materials Project, NOMAD, Citrine Informatics. Нас цікавило, як ці ресурси реалізують моделювання властивостей матеріалів, автоматизований скринінг і оптимізацію складу. Ми також звернули увагу на принципи FAIR-даних і відкритої науки, які дедалі більше впливають на прозорість, відтворюваність і глобальну інтеграцію наукових результатів. Окремий акцент зроблено на цифрових екосистемах, особливості взаємодії в них та нових викликах, що пов'язані з екологічними та економічними чинниками. На прикладі згаданих платформ ми показуємо, як алгоритми машинного навчання допомагають долати ці бар'єри та відкривають нові можливості для цифрової трансформації галузі матеріалознавства.

матеріалознавство, методи штучного інтелекту, цифрові платформи, Materials Project, NOMAD, Citrine Informatics, цифрові екосистеми

Постановка проблеми. Матеріалознавство сьогодні переживає глибоку трансформацію, не лише технологічну, а й концептуальну. Цифрові інструменти, що стрімко розвиваються, змінюють уявлення про роль матеріалів у сталому виробництві та науці загалом [1-3]. У центрі цих змін – інтеграція штучного інтелекту з новими підходами до дослідження: від ізольованих експериментів до комплексних систем, які поєднують великі масиви даних, цифрове моделювання, хмарні обчислення та алгоритми машинного навчання [4-5]. В умовах Індустрії 4.0 змінюється не лише технічне оснащення лабораторій, а й самі принципи наукового пошуку. Дослідник працює з динамічними цифровими екосистемами, де дані, моделі та обчислення взаємодіють у реальному часі, відкриваючи нові горизонти для відкриттів.

Такий підхід відкриває нові горизонти для прогнозування властивостей матеріалів, оптимізації їхнього складу та структури, а також скорочення часу між науковою ідеєю та її практичною реалізацією [5-6]. У сучасному матеріалознавстві дедалі чіткіше простежується інтеграція фізичних процесів із цифровими моделями та аналітичними платформами. Галузь поступово набуває рис кіберфізичних систем [7-9]. Для України це не лише технологічний виклик, а й шанс посилити наукову спроможність, інтегруватися в міжнародні дослідницькі мережі та сприяти розвитку інноваційної економіки [9-10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження свідчать про динамічне зростання інтересу до використання штучного інтелекту в матеріалознавстві, особливо з 2018 року, що співпадає з активізацією глобальних процесів цифрової трансформації [1]. Наукові центри різних країн дедалі активніше застосовують алгоритми машинного навчання для прогнозування фізико-хімічних характеристик,

оптимізації складу та структури матеріалів, а також автоматизованого створення нових функціональних рішень [4, 6]. Значна частина таких досліджень орієнтована на розробку енергоощадних і екологічно безпечних матеріалів, що відповідає цілям сталого розвитку та принципам циркулярної економіки. Цифрове моделювання, хмарні обчислення та аналітика великих даних стали невід'ємними складовими сучасного інструментарію матеріалознавця. Ці зміни сприяють міждисциплінарній взаємодії, пришвидшують інноваційні процеси та формують основу для кіберфізичних дослідницьких систем [5, 7].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є окреслення актуальних тенденцій у розвитку матеріалознавства в умовах цифрової трансформації, з акцентом на використанні штучного інтелекту для вдосконалення наукових методів, моделювання властивостей матеріалів і підтримки засад сталого розвитку. Для досягнення цієї мети визначено низку дослідницьких завдань, зокрема аналіз основних напрямів впровадження інтелектуальних технологій у матеріалознавчу практику та оцінка потенціалу цифрових рішень у контексті міжнародної інтеграції України та переходу до сталих виробничих моделей.

Виклад основного матеріалу. Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про зміну фундаментальних принципів дослідницької діяльності в матеріалознавстві. Замість класичної схеми «гіпотеза → експеримент → аналіз» дедалі частіше застосовуються інтерактивні моделі, де цифрове моделювання, обробка даних і віртуальний скринінг відіграють роль початкових етапів дослідження [7]. Відкриті екосистеми знань дедалі активніше впливають на розвиток сучасної науки. Це динамічні середовища, які поєднують структуровані бази даних, алгоритмічні рішення та аналітичні платформи, створюючи умови для прозорого, колективного й міждисциплінарного дослідження.

Водночас цифрові інструменти не замінюють дослідника. Їхнє призначення – розширювати його можливості: працювати з великими обсягами даних, моделювати складні процеси та виявляти закономірності, що раніше залишалися поза межами традиційного аналізу. Створення нових матеріалів потребує поєднання глибокої предметної компетентності з сучасними засобами аналізу. У цьому контексті методи машинного та глибинного навчання відіграють ключову роль у формуванні нової дослідницької парадигми, орієнтованої на швидке, цілеспрямоване та ресурсоефективне проектування матеріалів.

Цифрова трансформація матеріалознавства супроводжується активним впровадженням інтелектуальних алгоритмів, які змінюють логіку досліджень – від ручного експериментування до автоматизованого аналізу та прогнозування [11-13]. Нижче подано класифікацію основних методів ШІ, що використовуються в галузі, відповідно до підходів, типів алгоритмів чи методології (рис. 1), з коротким поясненням їх ролі та прикладів застосування:

1. Кластеризація та зменшення розмірності. У роботі з багатовимірними даними часто виникає потреба у їхньому спрощенні для подальшого аналізу. Для візуалізації багатовимірних даних та виявлення прихованих структур застосовуються методи зменшення розмірності, зокрема аналіз головних компонент (PCA), алгоритм локального вкладення даних (t-SNE), та алгоритм компактного багатовимірного проектування (UMAP).

2. Машинне навчання (ML). Алгоритми машинного навчання дедалі частіше використовуються для виявлення закономірностей між структурними характеристиками матеріалів і їхніми властивостями. Такий підхід дає змогу не лише описувати вже відомі зв'язки, а й прогнозувати поведінку нових сполук на основі

наявних даних. Методи, такі як: дерева рішень (Decision Trees), метод опорних векторів (SVM) чи ансамблеві моделі (Random Forest), застосовуються для класифікації матеріалів, оцінки їхньої стабільності або прогнозу теплопровідності, електропровідності, твердості, фазових переходів тощо. Основними функціями цього класу є прогноз властивостей, класифікація та регресійний аналіз [14].

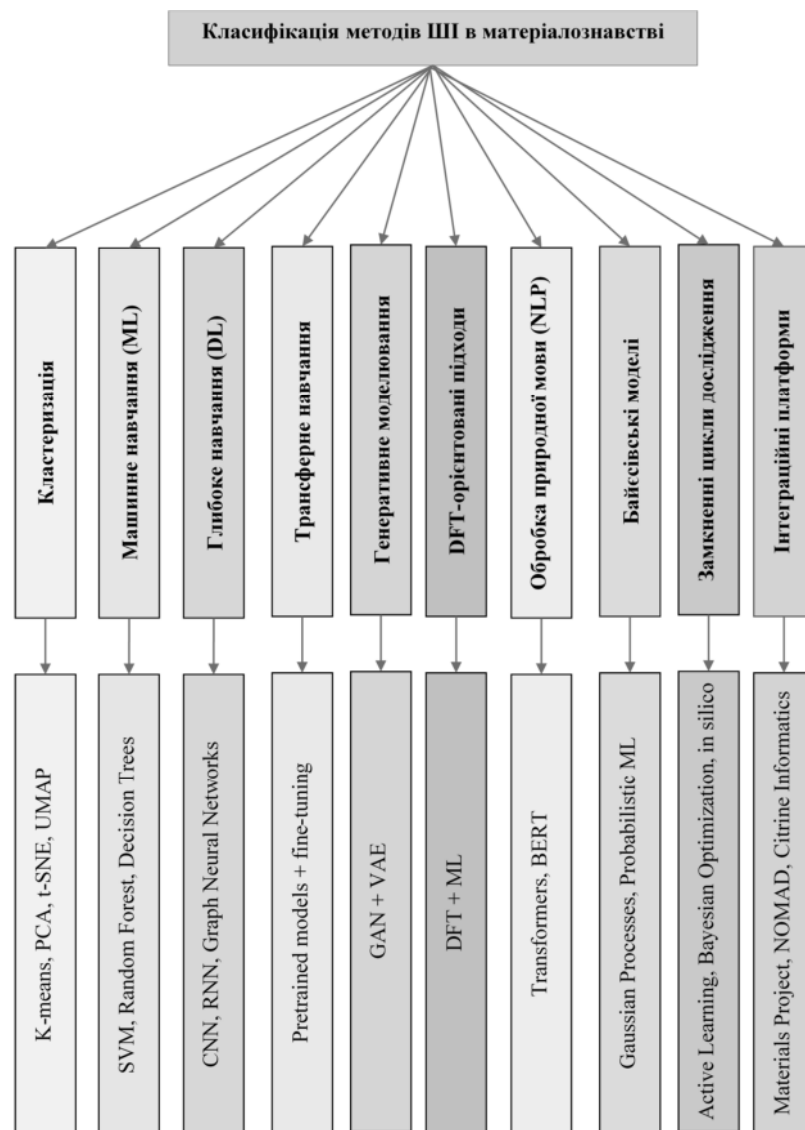


Рисунок 1 – Класифікація методів ШІ в матеріалознавстві

Джерело: розроблено на основі [3-7]

3. Глибинне навчання (DL). Згорткові (CNN), рекурентні (RNN) чи графові нейронні мережі (Graph Neural Networks) здатні обробляти складні дані, зокрема зображення мікроструктур або спектри. Вони використовуються для виявлення складних патернів, обробки зображень, структур для аналізу SEM-знімків, виявлення дефектів та генерації нових структур.

4. Трансферне навчання. У сфері машинного навчання дедалі більше уваги привертає підхід, який дозволяє переносити накопичені знання з однієї задачі на іншу. Це особливо корисно, коли обсяг доступних даних обмежений, але є можливість скористатися вже навченою моделлю. Наприклад, алгоритм, розроблений на основі

даних про металічні сплави, може бути переорієнтований на аналіз властивостей керамічних матеріалів або інших типів речовин.

5. Генеративне моделювання. Одним із актуальних напрямів цифрового матеріалознавства є застосування генеративних алгоритмів, зокрема варіаційних автоенкодерів (VAE) та генеративних змагальних мереж (GAN). Ці моделі здатні створювати штучні зображення мікроструктур, моделювати їхню еволюцію під дією зовнішніх факторів і прогнозувати, як зміни в хімічному складі впливають на функціональні властивості матеріалів. Зокрема, GAN-архітектури вже використовуються для синтезу візуальних представлень наноструктурованих поверхонь, що відкриває можливість віртуального скринінгу нових композицій без проведення фізичних експериментів.

6. DFT-орієнтовані підходи. Поєднання методів машинного навчання з фізичними моделями, зокрема з теорією функціоналу електронної густини (DFT), дає змогу підвищити точність прогнозування властивостей матеріалів. Такий підхід дозволяє з одного боку враховувати фундаментальні закономірності електронної структури, а з іншого – зберігати ефективність при розрахунках.

7. Обробка природної мови (NLP). Інструменти на основі трансформерів (наприклад, BERT) використовуються для аналізу наукових текстів, витягу знань із публікацій та побудови онтологій матеріалознавства [15].

8. Байєсівські моделі. Ці алгоритми дозволяють враховувати невизначеність у даних та прогнозах. Вони корисні для оптимізації складу матеріалів, коли важливо оцінити ризики та варіативність результатів [12].

9. Замкнені цикли досліджень. Це підходи, що передбачають автоматичне оновлення моделей на основі нових експериментальних або симуляційних даних. Вони реалізуються через активне навчання, байєсівську оптимізацію та роботизовані лабораторії. Використання *in silico*-методів стало ключовим елементом сучасного матеріалознавства, забезпечуючи високу масштабованість, оперативність та орієнтацію досліджень на конкретні цілі.

10. Інтеграційні платформи. Системи, подібні до Materials Project, NOMAD, Citrine Informatics, AFLOW, OQMD та інші [16] об'єднують бази даних, алгоритми та інтерфейси для дослідників. Вони забезпечують доступ до структурованої інформації, інструментів аналізу та API для автоматизації досліджень.

Синергія віртуального моделювання, глибинного навчання, обробки природної мови та квантових обчислень закладає основу нової дослідницької парадигми, з акцентом на швидке, адаптивне та економне створення матеріалів із заданими властивостями. Сучасні цифрові платформи, поєднуючи в собі структуровані бази даних, інструменти симуляції та алгоритми штучного інтелекту, формують сучасну інфраструктуру матеріалознавчих досліджень [7]. Ці технології не замінюють науковця, а розширюють його аналітичні можливості, підвищують точність прогнозів і забезпечують конкурентні переваги в умовах глобалізованої наукової екосистеми.

У процесі цифрової трансформації матеріалознавства важливу роль відіграють як відкриті, так і комерційні цифрові платформи, що забезпечують доступ до масштабних масивів структурованих даних, інструментів моделювання та засобів взаємодії з алгоритмами штучного інтелекту (табл. 1).

Однією з найвідоміших у цій галузі є платформа Materials Project. Вона функціонує як відкритий репозиторій матеріалознавчих даних, що охоплює понад 200 тисяч неорганічних сполук, для яких за допомогою методів DFT обчислено широкий спектр властивостей – від електронних і механічних до магнітних і термодинамічних.

Materials Project надає дослідникам потужний набір інструментів для моделювання кристалічних структур, побудови фазових діаграм, аналізу стабільності фаз, оцінки електропровідності та прогнозування енергетичних характеристик хімічних реакцій. Зручний інтерфейс дозволяє здійснювати пошук за різними критеріями: хімічним складом, симетрією, енергетичними параметрами тощо, що значно полегшує орієнтацію в багатовимірному просторі матеріалів.

Таблиця 1 – Порівняння основних матеріалознавчих цифрових платформ

Характеристика	Materials Project	NOMAD (Novel Materials Discovery)	Citrine Informatics
Тип платформи	Відкрита база даних і API	Європейська обчислювальна екосистема	Комерційна AI-платформа для R&D
Джерело даних	DFT-розрахунки, експерименти	Власні DFT-розрахунки, сторонні бази	Внутрішні дані компаній, лабораторні дані
Обсяг даних	більше 200 тис. матеріалів	більше 50 млн DFT-записів	Залежить від клієнта, приватні набори
Алгоритмічні можливості	ML-моделі, API для прогнозу	Візуалізація, порівняння, онтології	Вбудовані AI-моделі, трансферне навчання
Інтерфейс користувача	Веб-портал + API	Веб-інтерфейс + NOMAD Encyclopedia	Інтуїтивний UI + корпоративна інтеграція
Фокус на дослідника	Академічні дослідження, open science	Європейські консорціуми, HPC-доступ	Промислові R&D-команди
Можливості скринінгу	Віртуальний скринінг, фільтри	Пошук за властивостями, структурою	AI-дизайн матеріалів, оптимізація процесів
Моделі ШІ	ML-рекомендації, Crystal Graph	Підтримка ML через NOMAD AI Toolkit	Власні AI-моделі, Bayesian Optimization
Доступність	Безкоштовно, відкритий код	Безкоштовно	Платна, корпоративна ліцензія

Джерело: розроблено на основі [4, 6, 7]

Особливої уваги заслуговує можливість інтеграції платформи з зовнішніми програмними рішеннями через API, що відкриває шлях до автоматизованого скринінгу, побудови моделей машинного навчання та реалізації замкнених дослідницьких циклів. Materials Project активно використовується як в академічному середовищі, так і в промислових розробках. Таким чином, платформа виконує не лише роль джерела структурованих даних, а й слугує стратегічним інструментом, який поєднує в собі теоретичне моделювання, алгоритми штучного інтелекту та експериментальну перевірку в межах єдиного цифрового середовища.

У рамках європейських програм цифрової трансформації матеріалознавства особливе значення має платформа NOMAD Repository (Novel Materials Discovery), яка орієнтована на створення відкритої, стандартизованої та масштабованої інфраструктури для збереження, обміну й повторного використання наукових даних [4, 7]. Її архітектура базується на принципах FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), що гарантують прозорість, доступність і довготривалу наукову цінність інформації [4].

Платформа NOMAD об'єднує дані з різних джерел, від квантово-хімічних розрахунків до експериментальних результатів, і трансформує їх у єдиний формат із розширеними метаданими. Це дозволяє здійснювати гнучкий пошук, фільтрацію та

порівняння між різними наборами. Система підтримує широкий спектр симуляційних кодів, зокрема VASP, Quantum ESPRESSO, GPAW, ABINIT, та забезпечує автоматичне вилучення структурних, енергетичних і термодинамічних характеристик [4, 7].

Однією з ключових функцій NOMAD є можливість локального розгортання через систему NOMAD Oasis, яка дозволяє дослідницьким групам створювати власні архіви, інтегрувати внутрішні джерела даних і запускати аналітичні інструменти у власному середовищі [7]. Такий підхід забезпечує високий рівень автономності при збереженні сумісності з глобальним репозиторієм. Платформа також підтримує програмну інтеграцію через API, включаючи стандарти OPTIMADE та DCAT, що відкриває можливості для автоматизованого доступу до даних, їх використання в моделях машинного навчання та цифрових лабораторіях.

У сучасному прикладному матеріалознавстві, що активно трансформується під впливом цифрових технологій, особливе місце займають комерційні платформи, орієнтовані на вирішення завдань промислових досліджень і розробок. Однією з найпомітніших у цій категорії є екосистема Citrine Informatics, яка поєднує алгоритми машинного навчання, хімічну експертизу та інтерпретовану аналітику для прискореного створення нових матеріалів [6]. Заснована у 2013 році, платформа знайшла широке застосування в галузях полімерних матеріалів, сплавів, акумуляторних компонентів, покриттів і композитів.

Відмінною рисою Citrine є використання моделей машинного навчання, здатних не лише генерувати прогнози, а й пояснювати логіку отриманих результатів. Це особливо важливо для промислового застосування, оскільки дозволяє також роботу з обмеженими наборами даних, що зазвичай трапляється при експериментальних дослідженнях, обмежених часом чи ресурсом.

Платформа Citrine має відкриту архітектуру та надає повний контроль над даними, включає графічне середовище для інженерів та Python-клієнт для автоматизації робочих процесів. Це дозволяє в довгостроковій перспективі використовувати її в якості платформи для R&D-стратегії підприємства.

Інтеграція відкритих наукових платформ із комерційними цифровими рішеннями поступово формує складну багаторівневу екосистему. Вона здатна підтримувати як фундаментальні дослідження, так і прикладні інженерні розробки. Такий синтез технологій і підходів сприяє пришвидшенню інноваційних процесів у матеріалознавстві. Дослідники отримують доступ до структурованих баз даних, інструментів моделювання та засобів штучного інтелекту.

Становлення єдиного цифрового простору в галузі матеріалознавства не слід розглядати лише з позиції технічного оновлення інфраструктури, оскільки воно передбачає фундаментальніші зміни в самій науковій культурі. Дійсно, йдеться про переосмислення моделей співпраці, механізмів колективного управління знаннями та спільного прийняття рішень. У цьому контексті матеріальна інформатика виступає як міждисциплінарна наука, що поєднує елементи фізики конденсованих середовищ, хімії, комп'ютерних наук, машинного навчання та наукової комунікації.

Цифрові репозиторії, такі як Materials Project та NOMAD, платформи Citrine Informatics, OQMD, AFLOW та інші [15], задають нові орієнтири для дослідницької практики: від автоматизованого скринінгу матеріалів до обґрунтованого прогнозування основних властивостей. Можна констатувати, що під їх впливом відбувається перехід від інтуїтивного пошуку до системно-керованого проектування матеріалів. Також змінюється основна парадигма

Разом з тим, повноцінне використання подібних платформ зіштовхується з рядом викликів, як методологічного так і етичного характеру. Зокрема, нова парадигма

співпраці потребує виконання великого обсягу колективної роботи різних фахівців, їх кооперацію, а також взаємодію з ШІ. Індивідуальні здобутки інтегруються в колективні знання, а отже питання інтелектуальної власності, якості, відкритості і верифікації всіх досліджень, а особливо експериментальних, які впливатимуть на загальний результат, потреба в дотриманні протоколів та стандартизації метаданих. Додатково виникають питання у інклюзії цифрової інфраструктури, оскільки колективні знання, що генеруються відкритою співпрацею наукової спільноти апріорі повинні забезпечуватися рівним доступом всіх дослідників до баз даних, обчислювальних ресурсів, навчальних моделей тощо. А це вже безумовно стратегічні виклики, які потребують вирішення на рівні міжнародної наукової політики.

Слід зазначити, що говорячи про цифрові екосистеми матеріалознавства можна вже сьогодні виділити основні риси взаємодії в ній. Це, зокрема, міждисциплінарна інтеграція, інтелектуальна взаємодія, кооперація через сценарії, глобальна інклюзивність, інституційна відкритість, відтворюваність і прозорість.

Сьогодні, коли цифрові технології дедалі більше впливають на всі аспекти наукових досліджень, матеріальна інформатика в Україні виходить на передній план як напрям особливого значення. Залучення до міжнародних ініціатив, що були розглянуті в статті, відкриває українським науковцям шлях до використання найновіших інструментів для моделювання та прогнозування властивостей матеріалів.

Проте важливо не лише користуватися цими платформами, а й повністю використовувати потенціал, що вони надають, тобто активно долучати власні напрацювання до цих баз. Це сприятиме повноцінному обміну інформацією та посиленню присутності української науки на світовій арені.

Для реалізації такого підходу необхідно створити національні дата-центри, що відповідатимуть принципам FAIR і зможуть ефективно взаємодіяти з міжнародними інфраструктурами. Саме така технічна база може стати фундаментом для всеукраїнської програми з розвитку матеріальної інформатики, яка об'єднає академічні установи, профільні інститути та представників промисловості.

Не менш важливою є й освітня складова. Уже сьогодні технічні виші впроваджують дисципліни, пов'язані з аналізом даних, машинним навчанням і комп'ютерним моделюванням. Наступним логічним кроком має стати запуск міждисциплінарних програм, що поєднуюватимуть знання з матеріалознавства з цифровими навичками, необхідними для роботи в нових умовах.

Висновки. Наостанок, хотілося б виділити деякі ключові аспекти, виходячи з поставленої нами мети. Цифрові технології, від штучного інтелекту до відкритих наукових платформ, дедалі активніше змінюють те, як ми досліджуємо матеріали. Сучасне матеріалознавство вже не уявити без симуляцій, алгоритмів прогнозування та доступу до глобальних баз даних. У нашій роботі ми зосередилися на ключових напрямках цієї трансформації, зокрема на тому, як цифрові екосистеми допомагають пришвидшити відкриття та вдосконалити моделювання.

Україна має всі передумови, щоб стати активним учасником світової наукової спільноти. Але для цього недостатньо просто користуватися міжнародними платформами. Важливо також ділитися власними даними, моделями та результатами. Це означає, що нам потрібно розвивати національну інфраструктуру, яка відповідатиме міжнародним стандартам, і водночас оновлювати освітні програми, щоб поєднувати матеріалознавство з цифровими компетенціями.

У статті, на основі аналізу, ми виділяємо підходи, які можуть закласти базу нової дослідницької культури. Такий підхід не лише підвищує ефективність наукової роботи, а й сприятиме інтеграції українських дослідників в міжнародні наукові проєкти.

Список літератури

1. Butler K. T., Davies D. W., Cartwright H., Isayev O., Walsh A. Machine learning for molecular and materials science. *Nature*. 2018. Vol. 559, № 7715. P. 547–555. DOI: 10.1038/s41586-018-0337-2.
2. Ward L., Liu R., Krishna A., Hegde V. I., Agrawal A., Choudhary A., Wolverton C. Including crystal structure attributes in machine learning models of formation energies via Voronoi tessellations. *Physical Review B*. 2017. Vol. 96, № 2. Article 024104. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.024104.
3. Schmidt J., Marques M. R. G., Botti S., Marques M. A. L. Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science. *npj Computational Materials*. 2019. Vol. 5, № 1. Article 83. DOI: 10.1038/s41524-019-0221-0.
4. Draxl C., Scheffler M. NOMAD: The FAIR concept for big data-driven materials science. *MRS Bulletin*. 2019. Vol. 44, № 7. P. 570–576. DOI: 10.48550/arXiv.1805.05039.
5. Agrawal A., Choudhary A. Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the “fourth paradigm” of science in materials science. *APL Materials*. 2016. Vol. 4, № 5. Article 053208. DOI: 10.1063/1.4946894.
6. Citrine Informatics. AI-powered materials development platform: веб-сайт. URL: <https://citrine.io/> (дата звернення: 12.10.2025)
7. Nematov D., Hojamberdiev M. Machine learning-driven materials discovery: Unlocking next-generation functional materials – A review. *Comput. Condens. Matter*. 2025. Vol. 45. Article e01139. DOI: 10.1016/j.cocom.2025.e01139.
8. Aulin V. V., Kovalov S. H., Hrynkiv A. V., Kovalov Yu. G., Holovaty A. O., Kuzik O. V., Slon V. V. Enhancing Tribological System Performance through Intelligent Data Analysis and Predictive Modeling: A Review. *Problems of Tribology*. 2025. Vol. 30, № 3(117). P. 49–61. DOI: 10.31891/2079-1372-2025-117-3-49-61.
9. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О. Кіберфізичний підхід при створенні, функціонуванні та удосконаленні транспортновиробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. № 3(34). С. 331–343. DOI: 10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343.
10. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. Studying Truck Transmission Oils Using the Method of Thermal-Oxidative Stability During Vehicle Operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1, № 6. P. 6–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156150.
11. Xie T., Grossman J. C. Crystal Graph Convolutional Neural Networks for an accurate and interpretable prediction of material properties. *Physical Review Letters*. 2018. Vol. 120, № 14. Article 145301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.145301.
12. Talapatra A., Boluki S., Duong T., Qian X., Dougherty E., Arroyave R. Autonomous efficient experiment design for materials discovery with Bayesian model averaging. *Phys. Rev. Materials*. 2018. Vol. 2. Article 113803. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.113803.
13. Ren F., Ward L., Williams T., Laws K. J., Wolverton C., Hattrick-Simpers J., Mehta A. Accelerated discovery of metallic glasses through iteration of machine learning and high-throughput experiments. *Science Advances*. 2018. Vol. 4, № 4. Article eaq1566. DOI: 10.1126/sciadv.aq1566.
14. Chen C., Ye W., Zuo Y., Zheng C., Ong S. P. Graph networks as a universal machine learning framework for molecules and crystals. *Nature Communications*. 2020. Vol. 10, № 1. Article 357. DOI: 10.1038/s41467-020-19964-7.
15. Tshitoyan V., Dagdelen J., Weston L., Dunn A., Rong Z., Kononova O., Persson K. A., Ceder G., Jain A. Unsupervised word embeddings capture latent knowledge from materials science literature. *Nature*. 2019. Vol. 571, № 7763. P. 95–98. DOI: 10.1038/s41586-019-1335-8.
16. Kalidindi S. R. Materials data science: Current status and future outlook. *Annual Review of Materials Research*. 2015. Vol. 45. P. 171–193. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070214-020844.

References

1. Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., & Walsh, A. (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 559(7715), 547–555. doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2.
2. Ward, L., Liu, R., Krishna, A., Hegde, V. I., Agrawal, A., Choudhary, A., & Wolverton, C. (2017). Including crystal structure attributes in machine learning models of formation energies via Voronoi tessellations. *Physical Review B*, 96(2), 024104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.024104>.
3. Schmidt, J., Marques, M. R. G., Botti, S., & Marques, M. A. L. (2019). Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science. *npj Computational Materials*, 5(1), 83. <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0221-0>.
4. Draxl, C., & Scheffler, M. (2019). NOMAD: The FAIR concept for big data-driven materials science. *MRS Bulletin*, 44(7), 570–576. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.05039>.
5. Agrawal, A., & Choudhary, A. (2016). Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the “fourth paradigm” of science in materials science. *APL Materials*, 4(5), 053208. doi.org/10.1063/1.4946894.
6. Citrine Informatics. (2025). AI-powered materials development platform. Retrieved from <https://citrine.io/>.

7. Nematov, D. & Hojamberdiev, M. (2025). Machine learning-driven materials discovery: Unlocking next-generation functional materials – A review. *Comput. Condens. Matter*, 45, e01139. doi.org/10.1016/j.cocom.2025.e01139.
8. Aulin, V. V., Kovalov, S. H., Hryn'kiv, A. V., Kovalov, Yu. G., Holovaty, A. O., Kuzik, O. V., & Slon, V. V. (2025) Enhancing Tribological System Performance through Intelligent Data Analysis and Predictive Modeling: A Review. *Problems of Tribology*, 30(3/117), 49–61. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-49-61>.
9. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Kiberfizychnyy pidkhdid do stvorennnya, funktsionuvannya ta vdoskonalennya transportnykh ta vyrobnychkykh system [Cyber-physical approach to the creation, functioning and improvement of transport-production systems]. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, (3)34, 331–343. doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343 [in Ukrainian].
10. Aulin, V., Hryn'kiv, A., Lysenko, S., Rohovskii, I., Chernovol, M., Lyashuk, O., & Zamota, T. (2019). Studying Truck Transmission Oils Using the Method of Thermal-Oxidative Stability During Vehicle Operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(6), 6–12. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150.
11. Xie, T., & Grossman, J. C. (2018). Crystal Graph Convolutional Neural Networks for an accurate and interpretable prediction of material properties. *Physical Review Letters*, 120(14), 145301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.145301>.
12. Talapatra, A., Boluki, S., Duong, T., Qian, X., Dougherty, E., & Arroyave, R. (2018). Autonomous efficient experiment design for materials discovery with Bayesian model averaging. *Phys. Rev. Materials* 2, 113803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.113803>.
13. Ren, F., Ward, L., Williams, T., Laws, K. J., Wolverson, C., Hattrick-Simpers, J., & Mehta, A. (2018). Accelerated discovery of metallic glasses through iteration of machine learning and high-throughput experiments. *Science Advances*, 4(4), eaq1566. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aq1566>.
14. Chen, C., Ye, W., Zuo, Y., Zheng, C., & Ong, S. P. (2020). Graph networks as a universal machine learning framework for molecules and crystals. *Nature Communications*, 10(1), 357. doi.org/10.1038/s41467-020-19964-7.
15. Tshitoyan, V., Dagdelen, J., Weston, L., Dunn, A., Rong, Z., Kononova, O., Persson, K. A., Ceder, G., & Jain, A. (2019). Unsupervised word embeddings capture latent knowledge from materials science literature. *Nature*, 571(7763), 95–98. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1335-8>.
16. Kalidindi, S. R. (2015). Materials data science: Current status and future outlook. *Annual Review of Materials Research*, 45, 171–193. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020844>.

Yurii Kovalov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Aulin**, Prof., Dr. tech. sci., **Serhii Kovalov**, PhD ped. sci., **Oleksandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Hryn'kiv**, Sr. Researcher, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Artificial Intelligence in Materials Research: Trends, Tools, and Transformations

This paper examines the evolving role of digital platforms in reshaping materials science through the lens of materials informatics. It focuses on three prominent initiatives—Materials Project, NOMAD Repository, and Citrine Informatics—that illustrate how artificial intelligence, computational modeling, and structured data infrastructures are converging to accelerate discovery and innovation. Each platform integrates machine learning algorithms, simulation tools, and data management systems to support tasks such as high-throughput screening, property prediction, and compositional optimization.

The study provides a comparative analysis of the functional architecture of these platforms, identifying core components that could inform the development of a national ecosystem for materials informatics. Particular attention is given to the principles of FAIR data (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), which underpin transparency, reproducibility, and collaborative research across borders. By examining how these platforms operationalize FAIR principles, the paper highlights pathways for aligning Ukrainian research infrastructure with international standards.

Traditional experimental approaches, while foundational, often face limitations in terms of scalability, cost, and time. The integration of AI-driven methods offers a promising alternative, enabling researchers to simulate, predict, and refine materials with greater efficiency. This shift calls for strategic investment not only in technical infrastructure but also in education. The paper proposes the development of interdisciplinary academic programs that combine materials science with data analytics, computational physics, and AI literacy.

Furthermore, the research outlines strategic directions for incorporating Ukrainian materials data into global platforms, emphasizing the importance of two-way knowledge exchange. Such integration would enhance the visibility of Ukrainian research and foster deeper international collaboration. The insights presented here aim to support both academic inquiry and policy development, offering a foundation for future initiatives in sustainable innovation and digital transformation within the materials science domain.

materials science, artificial intelligence methods, digital platforms, Materials Project, NOMAD, Citrine Informatics, digital ecosystems

Одержано (Received) 05.11.2025

*Прорецензовано (Reviewed) 11.11.2025
Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025*

А. В. Рутковський¹, ст. наук. співр., канд. техн. наук,

О. Г. Трапезон¹, пров. наук. співр., д-р техн. наук,

С. І. Маркович², доц., канд. техн. наук, **О. В. Бевз**², доц., канд. техн. наук

¹Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: rut2000@ukr.net, coating@ipp.kiev.ua, marko60@ukr.net, oleg_bevz@ukr.net

Розробка методики для експериментального визначення втомної міцності дослідних зразків з титанових сплавів з модифікованими поверхнями

В роботі розроблена ефективна методика визначення характеру впливу технологічних параметрів процесу модифікації на характеристики витривалості. Виконати експериментальну частину дослідження в стислі терміни дозволяє високочастотне навантаження зразків. З цієї метою пропонується використати магнітострикційний випробувальний пристрій, який функціонує по резонансному принципу при частоті близько (10–12) кГц. Передбачено застосування груп призматичних зразків із титанового сплаву ВТ1-0 і ВТ1-00, як модифікованих, так і тих, що не були піддані модифікації (обробці) азотуванням поверхневого шару. Розроблена система кріплення зразків для збудження в них двох вузлових форм резонансних коливань. Амплітуда W_0 вимірюється мікроскопом та підтримується в процесі випробувань; частота f вимірюється електронним частотоміром. Запропонована формула для визначення граничних значень витривалості, з можливістю проведення їх порівняння з відповідними висновками на основі побудованих втомних кривих.

втомна міцність, циклічні навантаження, іонне азотування, імпульсний режим, втомні криві

Постановка проблеми. Параметри або показники конструктивної міцності характеризують як міцність конструктивних елементів, так і їх довговічність (ресурс), несучу здатність, а головне надійність [1]. При цьому важливим фактором є міцність елементів при різноманітних видах навантаження (розтягування, згинання, контактного навантаження і т.п.) при лінійному, двох і трьохвісному напруженому стані з різним характером прикладення навантаження (імпульсним, тривалим, стаціонарним або змінним), при низьких та високих температурах, в умовах впливу оточуючого середовища (корозійно-ерозійне середовище і т.п.) [1, 2, 3]. Серед динамічних навантажень особливий інтерес представляють циклічні навантаження. При систематичному повторенні навантаження та розвантаження проходить накопичення дефектів структури матеріалу, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування конструкційних елементів від втоми [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Втомна міцність (витривалість) - важлива властивість системи елементів конструкцій. Дуже складно побудувати кількісну теорію втоми, яка б пов'язувала елементарні процеси з довговічністю під дією циклічного навантаження [1, 3, 6, 7]. Циклічне навантаження навіть простих матеріалів призводить до виникнення великої кількості різноманітних явищ. Це виправдовує розгляд питання втоми окремо від механічних властивостей. Відомо, що руйнування може мати місце при напруженнях, значно менших, ніж межа міцності, якщо їх прикладати по черзі з різними знаками. Наприклад, амплітуда напружень після 10^6 циклів навантаження (τ_{10^6}) становить 30...50 % від межі міцності більшості матеріалів [1, 8].

Установити максимальне циклічне навантаження, при якому матеріал не руйнується можна

за допомогою термомеханічних високочастотних випробувань на втому [8-10].

Разом з тим є актуальною проблемою розробка методики визначення впливу використання технологічного процесу модифікування титанових сплавів шляхом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі, який впливає на якість поверхневого шару, для визначення можливості керування значеннями параметрів їх конструктивної міцності та витривалості. Це й визначило мету та задачі дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження була розробка ефективної методики визначення характеру впливу технологічних параметрів процесу модифікації на характеристику витривалості.

Визначити технологічне експериментальне устаткування для швидкісних випробувань на витривалість при згинних коливаннях зразків з тонколистових матеріалів кількох груп зразків, як модифікованих, так і тих, що не були піддані модифікації (обробці) азотуванням поверхневого шару, використовуючи єдину технологію, змінюючи ті чи інші її параметри, насамперед тиск і температуру на високочастотному втомному устаткуванні.

Шляхом математичного моделювання процесу розробити формули для визначення граничних значень витривалості, з можливістю проведення їх порівняння з відповідними висновками на основі побудованих втомних кривих.

Виклад основного матеріалу. Виконати експериментальну частину дослідження в стислі терміни дозволяє високочастотне навантаження зразків. З цієї мети було використано магнітострикційний випробувальний пристрій, який функціонує по резонансному принципу при частоті близько (10–12) кГц (рис. 1).

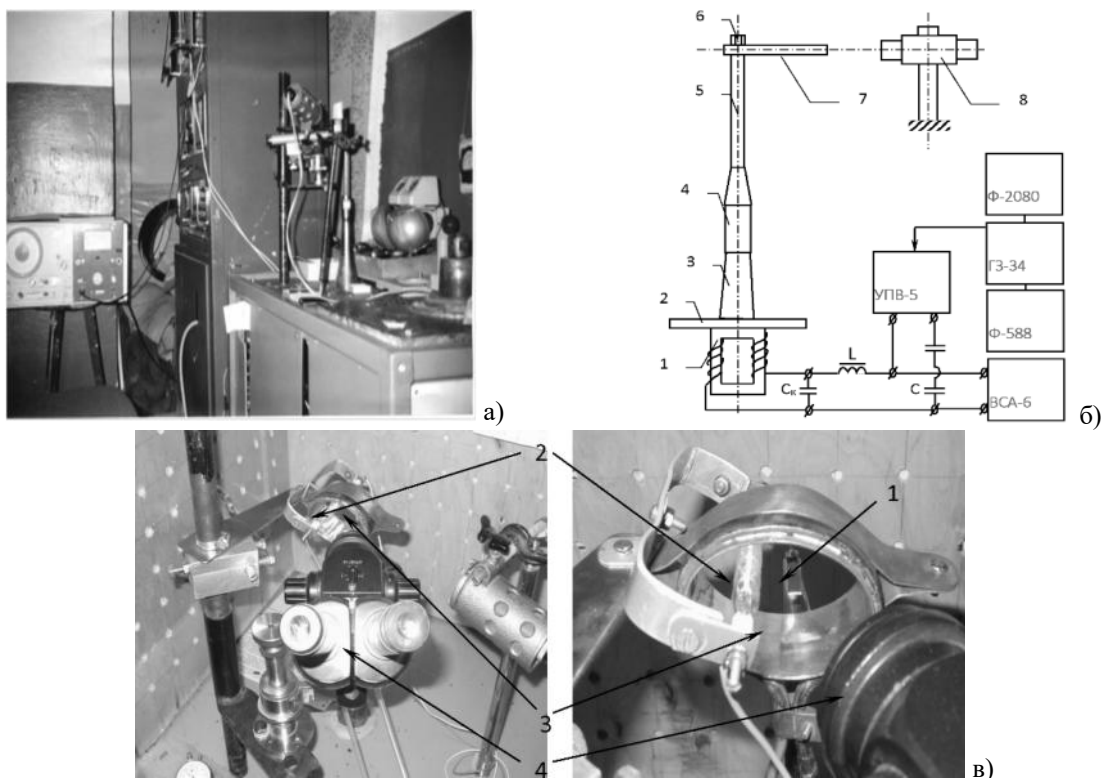


Рисунок 1 – Магнітострикційний випробувальний пристрій У-10: а) загальний вигляд; б) блок-схема (1 – вібратор; 2 – концентратор; 3 – фланець; 4 – накидна гайка; 5 – напівхвильовий концентратор; 6 – гайка; 7 – зразок; 8 – мікроскоп); в) зовнішній вигляд модернізованої установки (1 – зразок; 2 – джерело інфрачервоного випромінювання; 3 – камера нагрівання; 4 – мікроскоп)

Джерело: розроблено авторами

Методика втомних випробувань ґрунтується на збудженні двох вузлових форм резонансних коливань в призматичних зразках (рис. 2, 3).

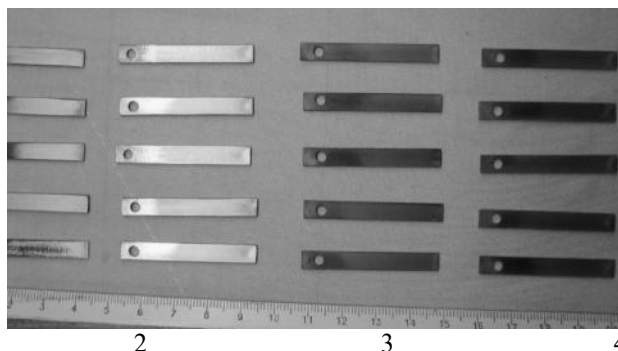


Рисунок 2 – Загальний вигляд зразків із титанового сплаву VT1-0 і VT1-00:

1 – титановий сплав VT1-0 до азотації; 2 – VT1-0 після азотації;
3 – титановий сплав VT1-00 до азотації; 4 – VT1-00 після азотації

Джерело: розроблено авторами

При точково-шарнірному закріпленні зразка на робочій частині установки (рис. 3), при його резонансних коливаннях з'являється втомна тріщина, місце якої знаходиться в зоні пучності коливань подальше від місця закріплення.

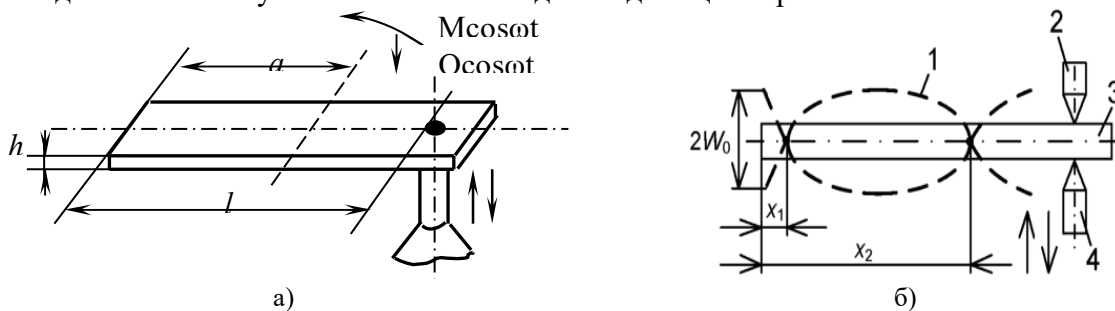


Рисунок 3 – Схема закріплення: а) та навантаження,

б) призматичного зразка при випробуваннях на втому: 1 – форма коливань; 2 – гвинт; 3 – зразок; 4 – вібратор

Джерело: розроблено авторами

Оскільки граничні умови для точково-шарнірного закріплення зразка не є стандартними, то при розв'язанні задачі додатково були використані результати вимірювання координат вузлових перерізів x_1 , x_2 (рис. 3), про що детально описано в. Конструктивно таке закріплення виконано з використанням малорозмірного (2-3 мм) спеціального гвинта 2 з потаємною головкою до вібратора 4, кінець якого виконано по конусу (рис. 3, а).

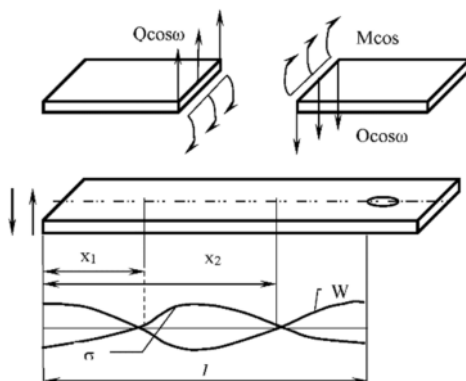


Рисунок 4 – Принцип навантаження призматичного зразка та розподіл у ньому прогинів W й напружень σ при коливаннях за третьою формою коливань

Джерело: розроблено авторами

Амплітуда W_0 вимірюється мікроскопом (рис. 1, в) та підтримується в процесі випробувань; частота f вимірюється електронним частотоміром. Коефіцієнт σ^* визначається на основі аналітичного розв'язку задачі про вільні коливання прямої балки постійного перерізу.

Визначимо особливості розрахунку коливань дослідних зразків та визначення циклічних напружень. В місці руйнування діють максимальні циклічні напруження $\sigma_{\max}$. Їх розрахунок проводиться за формулою

$$\sigma_{\max} = W_0 f^2 \sigma^*, \quad (1)$$

де W_0 – амплітуда коливань вільного кінця зразка (рис. 3, 4); f – резонансна частота коливань; σ^* – коефіцієнт, що залежить від форми коливань, густини матеріалу та товщини зразка.

Розглянемо алгоритм виводу формули (1). Використаємо рівняння власних форм коливань балки постійного перерізу, яка є аналогом зразків, що застосовуються

$$W'' + k^2 W = 0, \quad (2)$$

$$\text{де } k^4 = \frac{12\rho\omega^2}{Eh^2}; \quad (3)$$

$W=W(x)$ – прогини балки при коливаннях; ρ – густина матеріалу; $\omega=2\pi f$ – кругова частота коливань; E – модуль Юнга матеріалу балки; h – товщина балки.

Оскільки для балки з вільним кінцем при $x=0$ (рис. 4) рівняння (2) має розв'язок у вигляді

$$W = AS(kx) + BT(kx), \quad (4)$$

то максимальні по товщині нормальна напруження будуть визначатись залежністю

$$\sigma(x) = \frac{Ehk^2}{2} (AU(kx) + BV(kx)), \quad (5)$$

де S, T, U, V – функції Крілова.

При виборі довжини балки таким чином, що при заданій частоті f її коливання будуть мати форму з двома вузлами коливань при $x=x_1$ і $x=x_2$ (рис. 4), то з рівняння

$$\begin{vmatrix} S(kx_1) & T(kx_1) \\ S(kx_2) & T(kx_2) \end{vmatrix} = 0 \text{ можна знайти параметр } k \text{ а також відношення коефіцієнтів } B/A$$

$$\frac{B}{A} = -\frac{S(kx_1)}{T(kx_1)} = -\frac{S(kx_2)}{T(kx_2)}.$$

Знаючи k та B/A , можна побудувати функції прогинів (4) та напружень (5) на ділянці від $x=0$ до $x \leq x_2$ і визначити при цьому координату $x=x_0$, при якій нормальні напруження будуть максимальні, тобто $\sigma_{\max} = \sigma(x_0)$. Ця координата буде визначати місце вірогідного втомного руйнування зразка. Після внесення в (5) kx_0 та виключення з нього параметру E на основі виразу (2) отримаємо розрахункову формулу (1), в якій величина σ^* повинна бути розрахована відповідно до співвідношення

$$\sigma^* = \frac{24\rho\pi^2}{hk^2} \left[U(kx_0) + \frac{B}{A} V(kx_0) \right].$$

Висновки. 1. Вибрано технологічне експериментальне устаткування для швидкісних випробувань на витривалість при згинних коливаннях зразків з тонколистових матеріалів з застосуванням модифікованого магнітострикційного випробувального пристрою У-10.

2. Розроблено призматичні зразки з тонколистових матеріалів для проведення досліджень, система їх кріплень та принцип навантаження для визначення розподілу у ньому прогинів W й напружень σ при коливаннях.

3. Запропоновано формули для розрахунку максимальних циклічних напружень $\sigma_{\max}$.

4. Проведені розрахунки надають можливість визначити граничні значення витривалості, з можливістю проведення їх порівняння з відповідними висновками на основі побудованих втомних кривих.

Список літератури

1. Прочность материалов и конструкций. Под ред. В. Т. Трошенко. Киев: Академперіодика, 2006. 1074 с.
2. Трошенко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. Киев: Логос, 2000. 571 с.
3. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / В. Т. Трошенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский та ін. Ч. 2. Киев: Наукова думка, 1993. 702 с.
4. Колесник В. І., Мірненко В. І., Рутковський А. В., Бондар А. В. Підвищення довговічності деталей на основі титану, що працюють в умовах знакозмінних навантажень. Труды Академії. К.: НАОУ, 2003. № 41. С. 170–174.
5. Thongtem Somchai, Thongtem Titipun, McNallan Michael. Surface modification of the Ti–Al alloys. *Surface and Interface Anal.* 2001. Т. 32, № 1. Р. 214–217.
6. Рутковський А. В. Методика та результати прискореного визначення циклічної міцності титану з тонко плівковими нітридними покриттями / Рутковський А. В. та ін. 6-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей (21–23 травня 2003, Львів). Львів, 2013. С. 157–158.
7. Nazmy M., Staubli M. Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. Met. Et Mater.* 1994. Т. 31, № 7. Р. 829–833.
8. Gurappa I. Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxidation of Metals.* 2001. Т. 56, № 1–2. Р. 73–87.
9. Рутковський А. В., Маркович С. І., Михайлюта С. С. Аналіз напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2022. Вип. 6(37). Ч. І. С. 3–9.
10. Рутковський А. В., Маркович С. І., Михайлюта С. С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2020. Вип. 3(34). С. 72–81.

References

1. Troshchenko, V. T. (Ed.). (2006). Strength of materials and structures. Kyiv: Akademperіodyka [in Russian].
2. Troshchenko, V. T., Lebedev, A. A., & Strizhalo, V. A. (2000). Mechanical behavior of materials under various types of loading. Kyiv: Lohos [in Russian].
3. Troshchenko, V. T., Krasovskyi, A. Ya., Pokrovskyi, V. V., et al. (1993). Resistance of materials to deformation and fracture. Part 2. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
4. Kolesnyk, V. I., Mirnenko, V. I., Rutkovskyi, A. V., & Bondar, A. V. (2003). Increasing the durability of titanium-based parts operating under alternating loads. *Trudy Akademii*, 41, 170–174 [in Ukrainian].
5. Thongtem, S., Thongtem, T., & McNallan, M. (2001). Surface modification of the Ti–Al alloys. *Surface and Interface Analysis*, 32(1), 214–217.
6. Rutkovskyi, A. V., et al. (2013). Methodology and results of accelerated determination of cyclic strength of titanium with thin-film nitride coatings. In *Tezy dopovidei 6-ho Mizhnarodnoho sympoziumu ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi* (pp. 157–158). Lviv [in Ukrainian].
7. Nazmy, M., & Staubli, M. (1994). Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 31(7), 829–833.
8. Gurappa, I. (2001). Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy IMI 834. *Oxidation of Metals*, 56(1–2), 73–87.
9. Rutkovskyi, A. V., Markovych, S. I., & Mykhailiuta, S. S. (2022). Analysis of the stress–strain state of ion-nitrided coated specimens under isothermal and thermocyclic creep. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 6(37/1), 3–9 [in Ukrainian].
10. Rutkovskyi, A. V., Markovych, S. I., & Mykhailiuta, S. S. (2020). Heat resistance of ion-nitrided aluminum alloys under isothermal and thermocyclic loading. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 3(34), 72–81 [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy¹, PhD tech. sci, Sr. Researcher, Oleksandr Trapezon¹, DSc., leading researcher
Sergiy Markovych², Assos. Prof., PhD tech. sci, Oleg Bevz², Assos. Prof., PhD tech. sci.,

¹National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine

²Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Development of a Technique for Experimental Determination of Fatigue Strength of Test Samples of Titanium Alloys with Modified Surfaces

Cyclic load of even simple materials leads to a large number of different phenomena. This justifies the consideration of fatigue separately from mechanical properties. The experimental part of the study in a short time allows a high frequency load of samples. For this purpose, a magnetic stricking test device was used, which operates on a resonant principle at a frequency of about (10–12) KHz.

The method of fatigue tests is based on the excitation of two nodal forms of resonance vibrations in prismatic samples. When the point-fastening of the sample on the working part of the installation, with its resonant fluctuations, a fatigue crack appears, the place of which is in the area of the blanket of the oscillations of the fastener. Since the limiting conditions for point-sarry fixing of the sample are not standard, the results of measuring the coordinates of nodal sections x_1 , x_2 were additionally used when solving the problem.

The calculations make it possible to determine the limitations of endurance, with the possibility of their comparison with the corresponding conclusions on the basis of constructed fatigue curves.

ion nitriding, pulse mode, titanium alloy, wear resistance, free abrasive

Одержано (Received) 29.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.148-153](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.148-153)

М. М. Студент¹, проф., д-р техн. наук, О. Г. Лук'яненко¹, ст. дослідник., канд. техн. наук,
І. М. Погрелюк¹, проф., д-р техн. наук, С. І. Маркович², доц., канд. техн. наук,
В. С. Труш¹, ст. дослідник, д-р техн. наук

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: student.phmi@gmail.com, alukanenko246@gmail.com, irynapohrelyuk@gmail.com,
marko60@ukr.net, trushvasyl@gmail.com

Антифрикційні властивості титанового сплаву ВТ6, зміцненого дифузійним насиченням елементами втілення

В роботі вивчали вплив модифікування поверхні титанового сплаву ВТ6 елементами втілення (азот, кисень) для підвищення його трибологічних характеристик в парі із контртілом із сталі Х18Н10Т в умовах тертя ковзанням без мащення за питомого навантаження 1,0 МПа упродовж 600 с. Хіміко-термічною обробкою на титанових зразках було сформовано дифузійні поверхнево зміцнені шари. Визначено їх фазовий склад, який після азотування відповідав нітриду титану, оксидування – оксиду титану, а після оксинітрування – оксинітриду титану. Коефіцієнт тертя у парі азотований сплав ВТ6 – сталь Х18Н10Т зростає у часі випробувань та досягав високого значення ($f = 0,6$). Гострі виступи на азотованій поверхні зрізали шари нержавної сталі. Коефіцієнт тертя у парі оксидований та оксинітрований ВТ6 – сталь Х18Н10Т знижувався у часі та досягав низьких значень ($f = 0,15 \dots 0,20$), що відбувалось внаслідок притирання поверхонь цих елементів тертя.

титановий сплав ВТ6, хіміко-термічна обробка, фазовий склад, коефіцієнт тертя

Постановка проблеми. Титанові сплави широко використовуються в аерокосмічній, оборонній та суднобудівній промисловості завдяки їх низькій питомій вазі, високій питомій міцності та корозійній стійкості [1-3]. Останнім часом загострилася потреба у підвищенні зносостійкості та трибологічних характеристик за одночасного зменшення ваги важких безпілотних літальних апаратів (дронів), як військового, так і цивільного призначення. Актуальною залишається заміна лопаток із нікелевих сплавів газотурбінних двигунів літаків та вертольотів, сталевих хромованих штоків гідроциліндрів, шестерень, зубчастих коліс дронів на титанові. Зокрема, заміна сталевих гідроциліндрів на титанові дасть можливість зменшити вагу важких безпілотних літальних апаратів на десятки кілограм. Це дозволить підвищити їх вантажопідйомність, а, отже, збільшити кількість гербіцидів під час обприскування полів, якщо це сільськогосподарські дрони, або збільшити кількість вибухівки на військових дронах. Елементи кріплення з титанових сплавів не менш міцні, ніж сталеві і відіграють важливу роль у зниженні ваги літальних апаратів. Разом з тим, титанові сплави мають низьку зносостійкість та схоплюються під час тертя з елементами кріплення. Тому елементи кріплення із титанових сплавів можна застосовувати лише із зносостійкими покриттями [4-7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для підвищення трибологічних характеристик титанових сплавів найбільш вдалим є дифузійні покриття, отримані хіміко-термічною обробкою титанових сплавів, завдяки якій відбувається твердорозчинне

зміцнення поверхневих шарів елементами втілення (кисень, азот) та формування оксидних або нітридних шарів на поверхні [6, 7]. Така хіміко-термічна обробка не змінює товщини деталей та їх шорсткість. Сам процес хіміко-термічної обробки суміщається із термічною обробкою на максимальну міцність та ударну в'язкість і відбувається у регламентованому газовому середовищі за температури не вищої за 850°C продовж 2...5 годин. Перевагою такого способу оброблення є можливість одночасно проводити хіміко-термічну обробку сотень деталей. В процесі хіміко-термічної обробки деталей із титанових сплавів авіаційної техніки формується градієнтно-зміцнений приповерхневий шар товщиною до 200 мкм з підвищеними трибологічними та фізико-механічними характеристиками. Завдяки запропонованій градієнтній структурі зміцненого шару (фазова плівка та твердий розчин втілення) з регламентованими характеристиками (товщина фазової плівки, твердість поверхні та глибина зміцненого шару) буде забезпечено як високу зносостійкість, так і хороші втомні властивості [6, 7].

Постановка завдання. Мета роботи – підвищення трибологічних характеристик титанового сплаву ВТ6 формуванням на його поверхні шарів, дифузійно модифікованих елементами втілення. Для цього необхідно:

- хіміко-термічною обробкою сформуванати фазово-структурний стан (фазова плівка та твердий розчин втілення) приповерхневого шару на зразках титанового сплаву ВТ6 різними домішками втілення (O_2 , N_2);
- визначити отримані характеристики поверхневого шару (шорсткість, мікротвердість, фазовий склад поверхні) після різних ХТО;
- виконати порівняльні трибологічні дослідження роботоздатності отриманих поверхневих структур за сухого зворотно-поступального тертя у парі з контртілом зі сталі Х18Н9Т.

Матеріали та методики досліджень. Досліджували зразки з титанового сплаву ВТ6 системи легування Ti-6Al-4V-3 фазовим складом ($\alpha+\beta$), хімічний склад якого наведено в табл. 1.

Таблица 1 – Хімічний склад титанового сплаву ВТ6 (ГОСТ 19807-74)

Марка Сплаву	Легувальні елементи, мас. %							
	V	Al	C	Fe	Si	O	N	H
ВТ6	4,30	6,20	0,10	0,30	0,15	0,20	0,05	0,015

Для формування зміцнених шарів зразки піддавали хіміко-термічній обробці (ХТО) у вакуумній печі за наступними режимами:

1) Режим оксидування. Зразки нагрівали в електричній печі у вакуумі ($P = 0,6$ mPa) до 750°C, витримували 5 год у вакуумі 0,1 Pa, охолоджували до 350°C і напускали атмосферне повітря, після чого охолоджували піч із зразками до кімнатної температури.

2) Режим азотування. Зразки нагрівали у вакуумі ($P = 0,6$ mPa) до 850°C, напускали технічний азот до тиску $P = 10^5$ Pa, витримували 3 год, охолоджували в азоті до 250°C, вакуумуванням видаляли азот та охолоджували піч із зразками до кімнатної температури.

3) Режим оксинітрування. Зразки в електричній печі нагрівали у вакуумі ($P = 0,6$ mPa) до 650°C, напускали азот-кисневу суміш (80% N_2 + 20% O_2) до тиску $P = 0,01$ Pa, нагрівали до 850°C та витримували 3 год, вакуумували та витримували 0,5 год та охолоджували піч із зразками до кімнатної температури.

Мікротвердість в перерізах приповерхневих шарів визначали на приладі PMT-3M за навантаження на індентор 0,49 N. Трибологічні характеристики трибопари «циліндр – пластина» визначали на трибометрі в умовах зворотно-поступального руху циліндра Ø10 mm з нержавної сталі X18H10T з полірованою поверхнею контакту (рис. 1). Зразки у вигляді пластини 15×25×1 mm із титанового сплаву BT6 оксидували, азотували та оксинітрували. Фрикційну поведінку титанового сплаву BT6 зі зміцненою поверхнею визначали за умов тертя без мащення за питомого навантаження 1 МПа в умовах зворотно-поступального переміщення на 10 mm циліндра по пластині.

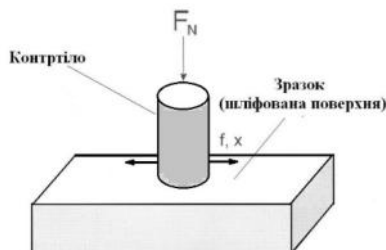


Рисунок 1 – Схема дослідження фрикційних властивостей поверхнево зміцнених шарів на сплаві BT6 за тертя ковзанням

Джерело: розроблено авторами

Фазовий склад поверхневих шарів металу визначали на рентгенівському дифрактометрі DRON-3.0 у монохроматичному $\text{CuK}\alpha$ - випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Бреґґа–Брентано. Напруга на аноді рентгенівської трубки 30 кВ за струму 20 мА. Сканували з кроком $0,05^\circ$. Використовували програмне забезпечення Sietronix, PowderCell 2.4 і FullProf, за допомогою яких виконували Фур'є-обробку дифрактограм, визначали місця дифракційних максимумів відбиття і періоди ґраток, ідентифікованих за даними для фаз з картотеки JCPDS - ASTM.

Стан поверхні до та після дифузійного насичення й фрикційного зносу досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа EVO-40XVP, а хімічний склад поверхневого шару металу визначали з використанням системи мікроаналізу INCA Energy 350.

Виклад основного матеріалу. В процесі хіміко-термічної обробки на плоских титанових зразках було сформовано дифузійні покриття. Фазовий склад покриття після азотування за стехіометричним складом відповідав $\sim\text{TiN}_{1,83}$, після оксидування – оксиду титану ($\sim\text{TiO}_2$), а після оксинітрування – оксинітриду титану, який за складом був близьким до еквіатомного ($\sim\text{TiN}_{0,46}\text{O}_{0,54}$) (рис. 2).

Спектральним аналізом поверхневого шару сплаву BT6 після азотування у ньому окрім азоту (9,55 мас.%) виявлено значний вміст кисню (4,32 мас.%) табл. 2. Однак така кількість кисню не приводить до формування оксинітридного шару. Фазовий аналіз вказує на формування на поверхні модифікованого шару лише нітриду титану рис. 2. Очевидно, це зумовлено тим, що азотування проводили в атмосфері технічно чистого азоту, який містив певну кількість кисню. На поверхні оксидованого шару виявлено 14,31 мас. % кисню, що підтверджує формування шару із оксиду титану. На поверхні оксинітрованого шару виявлено значну кількість як кисню так і азоту, що підтверджує формування на поверхні сплаву BT6 шару з оксинітриду титану табл. 2.

Шорсткість поверхні зразків та їх мікротвердість після хіміко-термічної обробки наведено у таблиці 3. Мікротвердість та шорсткість поверхні плоских зразків з титанового сплаву BT6 до ХТО становили $(194,6 \pm 3,3) \text{HV}_{0,49}$ та $R_a = 0,067 \pm 0,005 \mu\text{m}$ відповідно. Азотування титанового сплаву підвищило мікротвердість його поверхні до $(983 \pm 82) \text{HV}_{0,49}$. Мікротвердість оксидованого шару виявилась нижчою – (755 ± 40)

$HV_{0,49}$, а оксинітридний шар відзначився найменшою мікротвердістю – $(557 \pm 32) HV_{0,49}$, хоча у 2,8 рази перевищує мікротвердість сплаву ВТ6 без хіміко-термічної обробки.

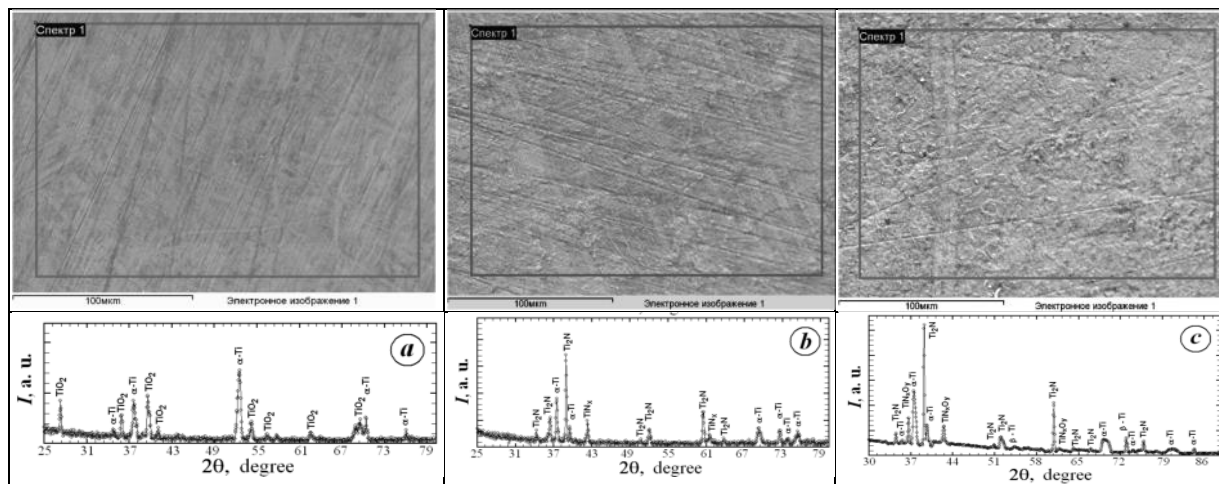


Рисунок 2 – Морфологія поверхні зразків сплаву ВТ6 з дифузійно модифікованими шаром та її фазовий склад: *a* – TiN; *b* – TiO; *c* – TiNO

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Елементний склад поверхневих шарів зразків титанового сплаву ВТ6 після різних типів ХТО

Елемент	Азотування (TiN)		Оксидування (TiO)		Оксинітрування (TiNO)	
	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %
N	9,55	20,49	0,00	0,00	6,73	17,00
O	4,32	9,43	14,31	30,51	7,62	16,39
Al	4,55	5,95	4,52	5,71	4,72	6,05
V	3,88	2,67	3,05	2,07	3,11	2,12
Ni	0,14	0,1	0,11	0,07	0,17	0,11
Fe	0,17	0,10	0,31	0,19	0,25	0,15
Ti	залишок		залишок		залишок	

Джерело: розроблено авторами

Шорсткість поверхні сплаву ВТ6 після хіміко-термічної обробки практично не залежала від технології поверхневого оброблення табл. 3.

Таблиця 3 – Показники шорсткості та мікротвердості поверхні титанового сплаву ВТ6 після ХТО

Тип ХТО	Після ХТО	
	$R_a, \mu m$	$HV_{0,49}, \text{кг/мм}^2$
Азотування	$0,264 \pm 0,007$	983 ± 82
Оксидування	$0,257 \pm 0,007$	755 ± 40
Оксинітрування	$0,264 \pm 0,009$	557 ± 32

Джерело: розроблено авторами

В процесі тертя пари необробленого сплаву ВТ6 – сталь Х18Н9Т відбувалося мікроприварювання виступів поверхні та схоплення поверхонь. Трибологічні дослідження показали, що після азотування коефіцієнт тертя (f) сплаву ВТ6 в парі зі сталлю Х18Н9Т в умовах осциляційного тертя без мащення суттєво підвищився до

значення 0,6 (рис. 3 а). При цьому зношувався сталевий стрижень внаслідок різання гострими виступами азотованої поверхні.

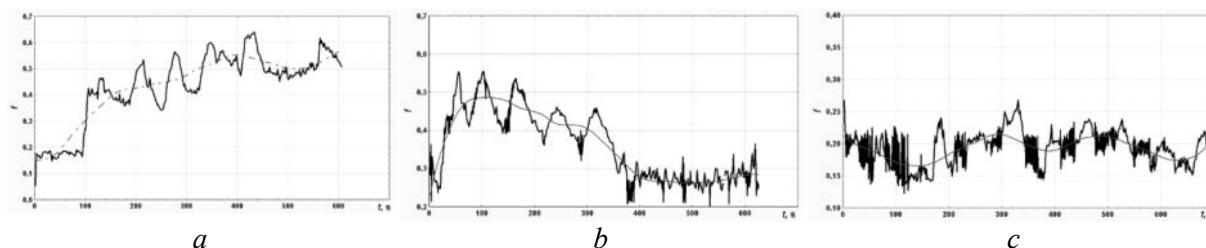


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта тертя (f) в часі t за сухого тертя ковзанням зразків зі сплаву ВТ6, поверхнево зміцнених азотуванням (а), оксидуванням (b) та оксинітруванням (c), що контактували зі стрижнем зі сталі Х18Н10Т за питомого навантаження 1,0 МПа

Джерело: розроблено авторами

Коефіцієнт тертя у парі сплав ВТ6 – сталь Х18Н9Т після оксидування та оксинітрування виявився суттєво меншим. Причому для пари оксидований ВТ6 – сталь Х18Н9Т він зменшувався у часі та досягав значень $f = 0,25 \dots 0,35$ (рис. 3 b), а у парі оксинітрований ВТ6 залишався стабільним впродовж випробовувань $f = 0,15 \dots 0,20$ (рис. 3 c). На відміну від азотованої поверхні сплаву ВТ6, оксидована та оксинітрована поверхня мали значно меншу мікротвердість (табл. 3) і при терті не різали своїми виступами поверхню контртіла, а під час трибологічних випробовувань відбувалося лише притирання поверхонь пари тертя (рис. 3 b, c).

Висновки. Застосування хіміко-термічної обробки у контрольованих газових середовищах позитивно вплинуло на трибологічну поведінку зразків сплаву ВТ6 у парі з нержавною сталлю Х18Н10Т, зокрема, перестало відбуватися схоплення контактуючих поверхонь під час сухого тертя ковзанням.

1. Хіміко-термічною обробкою на титанових зразках було сформовано дифузійні поверхнево зміцнені шари. Визначено їх фазовий склад, який після азотування відповідав $\sim \text{TiN}_{1,83}$, оксидування – оксиду титану типу $\sim \text{TiO}_2$, а після оксинітрування – оксинітриду титану типу $\sim \text{TiN}_{0,46}\text{O}_{0,54}$.

2. Коефіцієнт тертя у парі азотований сплав ВТ6 – сталь Х18Н10Т зростав у часі випробувань та досягав високого значення ($f = 0,6$). Гострі виступи на азотованій поверхні зрізали шари нержавної сталі.

3. Коефіцієнт тертя у парі оксидований та оксинітрований ВТ6 – сталь Х18Н10Т знижувався у часі та досягав нижчих значень: ($f = 0,25 \dots 0,35$) для оксидованої поверхні та ($f = 0,15 \dots 0,20$) – для оксинітрованої, що відбувалось внаслідок притирання поверхонь цих пар тертя.

Таким чином, підтверджена доцільність застосовування ХТО у контрольованих газових середовищах для виробів з титанових сплавів для їх роботи у парах тертя. Зокрема, для досягнення оптимальних співвідношень шорсткості та твердості контактуючих поверхонь для тривалої роботи цих трибопар, потрібні додаткові дослідження з оптимізації режимів ХТО титанових сплавів для отримання заданих характеристик поверхневих шарів металу.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту 2025.06/0028 «Розроблення технології поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів двигунів авіаційної техніки регламентованим дифузійним насиченням елементами втілення».

Список літератури

1. Budinski K. G. Tribological properties of titanium alloys. *Wear*. 1991. Vol. 151, Iss. 2. P. 203–217.
2. Bansal D. G., Eryilmaz O. L., Blau P. J. Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 2006–2015.
3. Bell T., Dong H., Sun Y. Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*. 1998. Vol. 31, № 1–3. P. 127–137.

4. Bansal D. G., Kirkham M., Blau P. J. Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*. 2013. Vol. 302. P. 837–844.
5. Diffusive thermal treatments combined with PVD coatings for tribological protection of titanium alloys / E. Marin, R. Offoiach, M. Regis, S. Fusi, A. Lanzutti, L. Fedrizzi. *Materials and Design*. 2016. Vol. 89. P. 314–322.
6. Погрелюк І. М., Федірко В. М., Довгунік В. М. Вплив азотування та оксидування на триботехнічні властивості титанових сплавів. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2000. № 3. С. 123–126.
7. Łępicka M., Grądzka-Dahlke M. Surface modification of Ti6Al4V titanium alloy for biomedical applications and its effect on tribological performance — a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2016. Vol. 46. P. 86–103.

References

1. Budinski, K. G. (1991). Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 151(2), 203–217.
2. Bansal, D. G., Eryilmaz, O. L., & Blau, P. J. (2011). Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 271, 2006–2015.
3. Bell, T., Dong, H., & Sun, Y. (1998). Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 31(1–3), 127–137.
4. Bansal, D. G., Kirkham, M., & Blau, P. J. (2013). Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*, 302, 837–844.
5. Marin, E., Offoiach, R., Regis, M., Fusi, S., Lanzutti, A., & Fedrizzi, L. (2016). Diffusive thermal treatments combined with PVD coatings for tribological protection of titanium alloys. *Materials and Design*, 89, 314–322.
6. Pohreliuk, I. M., Fedirko, V. M., & Dovhunuk, V. M. (2000). Influence of nitriding and oxidation on tribological properties of titanium alloys. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv*, 3, 123–126 [in Ukrainian].
7. Łępicka, M., & Grądzka-Dahlke, M. (2016). Surface modification of Ti6Al4V titanium alloy for biomedical applications and its effect on tribological performance — a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 46, 86–103.

Mykhailo Student¹, Prof., DSc., **Oleksandr Lukyanenko**¹, Sr. Researcher, PhD, **Iryna Pohreliuk**¹, Prof., DSc., **Vasil Trush**¹, Sr. Researcher, DSc., **Markovych Sergiy**², Assoc. Prof., PhD

¹Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

²Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Antifriction Properties of VT6 Titanium Alloy Strengthened by Diffusion Saturation with Interstitial Elements

Titanium alloys are widely used in the aerospace, defensive and shipbuilding industry due to their low weight, high specific strength and corrosion resistance. Recently, the need for increased durability and tribological characteristics of simultaneous weight loss of heavy unmanned aerial vehicles (drones), both military and civilian purposes. Replacing steel parts with titanium will reduce the weight of heavy unmanned aircraft by tens of kilograms. However, titanium alloys have low durability and are grasped during friction with mounting elements. Therefore, the elements of attachment from titanium alloys can only be used with durable coatings. Which determined the purpose of the work - to increase the tribological characteristics of the titanium alloy of VT6 by the formation of layers on its surface, diffusely modified by interstitial elements.

For the formation of strengthened layers, samples were subjected to thermochemical treatment (TCT) in the vacuum oven according to the following modes: 1) Oxidation mode. The samples were heated in an electric furnace in a vacuum ($P = 0.6$ mPa) to 750 °C, kept 5 h in a vacuum 0.1 Pa, cooled to 350 °C and put atmospheric air, and then cooled the stove with samples to room temperature. 2) Nitriding mode. The samples were heated in vacuum ($P = 0.6$ mp) to 850 °C, technical nitrogen to $P = 10^5$ Pa, kept 3 h, cooled in nitrogen to 250 °C, vacuum removed nitrogen and cooled the oven with samples to room temperature. 3) Oxynitriding mode. The samples in the electric furnace were heated in vacuum ($P = 0.6$ mPa) to 650 °C, the nitrogen oxygen mixture (80% N_2 + 20% O_2) was allowed to pressure $P = 0.01$ Pa, heated to 850° C and kept 3 h, after cooling in vacuum to room temperature. Microhardness from surface and in the sections of the surface layers was determined on the PMT-3M device for the load on the indenter 0.49 N. The work studied the effect of modification of the Titanium alloy surface with the interstitial elements (nitrogen, oxygen) to increase its tribological characteristics paired with a countertil of X18H10T in conditions of dry friction with sliding with a specific load of 1.0 MPa for 600 s. By the thermochemical treatment of titanium samples was formed diffusion surface-strengthened layers. Their phase composition was determined, which after nitriding corresponded to $TiN_{1.83}$, after oxidation – titanium oxide TiO_2 , and after oxynitriding – titanium oxyinitride type $TiN_{0.46}O_{0.54}$. The friction coefficient in the pair of nitrided VT6 alloy – steel X18H10T increases during the test time and reached a high value ($f = 0.6$). Acute projections on the nitrided surface was cuted the layers of stainless steel. The friction coefficient in the pair of oxidized and oxinitrided VT6 alloy – steel X18H10T10T decreased over time and reached low values ($f = 0.15-0.20$), which was due to the grind in of the surfaces of these elements of friction.

VT6 titanium alloy, thermochemical treatment, phase composition, friction coefficient

Одержано (Received) 12.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.362:004.942

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.154-164](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.154-164)**Е. Б. Алієв**, проф., д-р техн. наук, **І. В. Литвинов***Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua, illalitinov901@gmail.com*

Чисельне моделювання системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Виконано комплексне чисельне моделювання процесу очищення сита щіткою в середовищі Simcenter Star-CCM+, що дозволило детально відтворити просторову взаємодію між елементами системи «сито – частинки матеріалу – щітка» та встановити закономірності впливу конструктивних і кінематичних параметрів на ефективність процесу очищення. Застосування моделі дискретних елементів (DEM) у поєднанні з Лагранжевою багатофазною постановкою забезпечило адекватне відображення контактної взаємодії гнучких волокон із частинками матеріалу та стінками конструкції, а використання нестационарного неявного розрахунку гарантувало стабільність і високу точність чисельного інтегрування. У результаті багатофакторного моделювання визначено вплив чотирьох основних параметрів – кута нахилу щітки, відносного розміру частинок, кількості волокон уздовж напрямку руху і швидкості переміщення – на три ключові критерії ефективності: частку частинок, що пройшли крізь сито, залишилися на поверхні та зійшли з неї.

чисельне моделювання, DEM, щітка, сито, частинки матеріалу, ефективність очищення

Постановка проблеми. У процесі роботи ситових машин під час сортування, очищення чи класифікації сипких матеріалів відбувається засмічення отворів сит частинками різного розміру, форми та вологості, що суттєво знижує їхню пропускну здатність і ефективність розділення. Для запобігання цьому застосовуються щіткові пристрої очищення, які взаємодіють із поверхнею сита, видаляючи застряглі частинки. Проте ефективність такої взаємодії залежить від великої кількості факторів – геометричних параметрів щітки та сита, фізико-механічних властивостей частинок, кінематичних режимів руху, кута нахилу щітки, густоти розміщення волокон тощо [1–2].

Експериментальне дослідження цих процесів є складним, трудомістким і не завжди дає змогу отримати повну інформацію про мікромеханіку взаємодії волокон щітки з частинками в отворах сита [3–5]. Тому постає необхідність у створенні чисельної моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка», яка б дозволила відтворити динаміку процесу очищення, оцінити вплив основних параметрів і визначити умови, за яких забезпечується найефективніше очищення сита.

Таким чином, проблема полягає у розробленні адекватної фізико-математичної та чисельної моделі, яка б описувала взаємодію частинок, щітки та поверхні сита, дозволяла прогнозувати ефективність очищення та оптимізувати конструктивні й кінематичні параметри щіткових систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні пакети DEM (зокрема Simcenter STAR-CCM+) розвивають моделі гнучких волокон з урахуванням внутрішнього демпфування зв'язків між сегментами. У релізі STAR-CCM+ 2210 з'явилась підтримка демпфування швидкості в моделі гнучких волокон, що дозволяє реалістично відтворювати затухання коливань волокон і підвищує стабільність та фізичність розрахунків. Це важливо для задач, де ворсини (волокна) коливаються в повітрі або під дією контактів і мають втрачати енергію не лише через зовнішній

аеродинамічний опір, а й через внутрішні механізми [6].

Останні роботи підтверджують, що форма частинок (асферичність, видовженість) суттєво змінює імовірність заклинювання отворів та транспортні властивості потоків частинок. CFD-DEM дослідження показують, що навіть при однаковому середньому діаметрі зміна форми може призвести до принципово різної динаміки «прохід/заклинювання» в отворах. Для задач просіювання й очищення сита це означає необхідність використання адекватних геометричних апроксимацій частинок у DEM (не лише сфер) або застосування моделей змішаних/складених частинок [8–9].

У DEM-дослідженнях для контактів «частинка–частинка» та «частинка–стінка» найчастіше застосовують модель Герца–Міндліна. Останні огляди й дослідження підкреслюють, що вибір і калібрування контактної моделі (жорсткість, коефіцієнт демпфування, коефіцієнт тертя) суттєво впливають на макроскопічну поведінку (включно з явищем заклинювання), тому необхідна експериментальна чи чисельна калібровка параметрів для конкретного матеріалу і діапазону навантажень [8, 10].

Аналітичні та чисельні дослідження [1, 11] механізмів блокування отворів надають формальні залежності та підходи до оцінки ймовірності заклинювання, але сучасні роботи все частіше комбінують DEM (для твердих тіл) та, за потреби, CFD (щоб врахувати вплив повітря/потoku), особливо коли рух частинок супроводжується значною аеродинамічною взаємодією. Окремі дослідження демонструють ефективність DEM-підходів для відтворення процесів заклинювання в вібраційних й інших ситових апаратах.

Праці [12], присвячені конкретним чистильним механізмам (еластичні кульки, щітки, рухомі елементи в комбайнах), демонструють користь CFD-DEM/DEM-MBD підходів для оптимізації конструкції та режимів. Дослідження показують вплив параметрів (частинки, кут нахилу, швидкість, геометрія щітки) на ефективність очищення і втрати матеріалу, що прямо корелює з вашою постановкою задачі.

Окрім STAR-CCM+ [13], інші DEM-платформи (наприклад, Rocky DEM [14]) також мають гнучкі моделі волокон із можливістю руйнування, пластичності та складнішої поведінки сегментів. Порівняльний аналіз підходів показує: моделі на основі послідовно зв'язаних циліндричних/сферо-циліндричних сегментів дають хорошу якість відтворення згинальних і осевих властивостей волокон при розумній обчислювальній ефективності [15].

Постановка завдання. Постановка задачі чисельного моделювання полягає у відтворенні й встановленні закономірностей процесу очищення сита від частинок матеріалу щіткою шляхом побудови просторової моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка».

Виклад основного матеріалу. Просторова схема моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка» наведена на рис. 1. Розглядається сітка розмірами $L_{gy} \times L_{gx}$, яка має рівномірно розташовані квадратні отвори зі стороною D_o . У отворах сита розміщуються частинки сипкого матеріалу, форма яких апроксимується композицією трьох сфер, з'єднаних у вигляді еліпсоїда, з характерними розмірами D_p і d_p . Такий підхід дозволяє врахувати асферичність та нерегулярність геометрії частинки матеріалу. Над поверхнею сита розташована область щітки з розмірами $L_{bx} \times L_{by} \times L_{bz}$, яка складається з волокон сферо-циліндричної форми у кількості 28×4 штук. Геометричні параметри кожного волокна визначаються діаметром D_b , довжиною L_{bz} і кількістю сегментів N_b . Щітка переміщується паралельно площині сита зі швидкістю V_b , імітуючи процес механічного очищення поверхні від частинок, що заклинюються в отворах. Під ситом розташований приймальний бункер для збору матеріалу, який проходить крізь отвори після дії щітки. Уся система «сито – щітка – частинки» розміщується в робочій області, що відповідає об'єму збірника сходу матеріалу. Таким чином, чисельна постановка задачі спрямована на дослідження закономірностей взаємодії волокон щітки з частинками, які знаходяться у отворах сита, та оцінку

ефективності їх видалення залежно від геометричних, кінематичних і фізико-механічних параметрів системи.

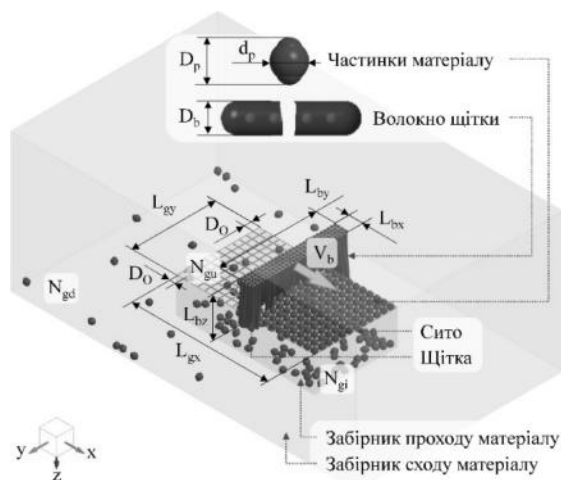


Рисунок 1 – Просторова схема моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

В проєкції наведено просторову схему моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка» (рис. 2).

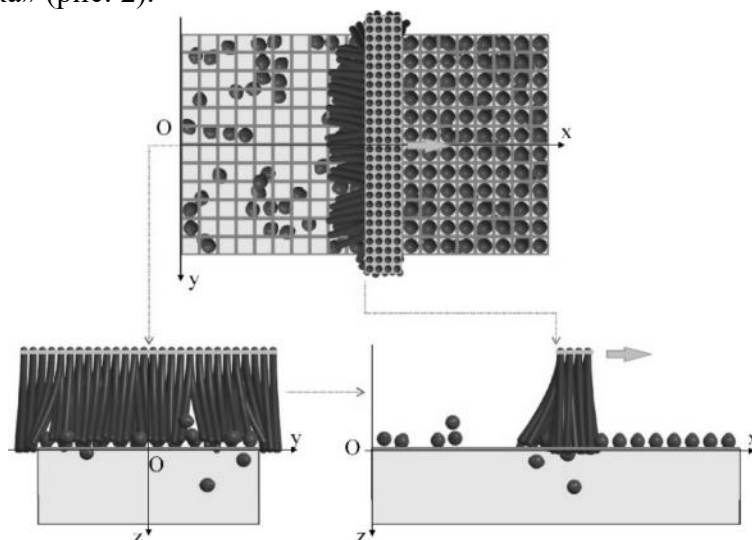


Рисунок 2 – Проєкції просторової схема моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

Для чисельного моделювання процесу очищення сита щіткою у програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ обрано комплекс фізичних моделей, що забезпечують адекватне відтворення механіки взаємодії гнучких волокон щітки, частинок матеріалу та елементів конструкції сита. Основними моделями є безсіткова DEM, Лагранжева багатофазність, модель дискретних елементів (DEM), Transient Implicit, Gravity, а також можливість Solution Interpolation для оптимізації чисельного рішення.

Безсіткова DEM використовується для моделювання руху та взаємодії частинок без потреби в структурованій сітці. Цей підхід забезпечує ефективну обробку великих масивів частинок, зменшує обчислювальні ресурси та дозволяє реалізувати складну кінематику волокон щітки при їхній взаємодії з частинками та стінками.

Лагранжева багатофазність дозволяє моделювати дві окремі фази: частинки матеріалу та волокна щітки, які рухаються незалежно, зберігаючи масові та кінематичні

характеристики. Кожна фаза визначається окремими фізичними властивостями та взаємодією з іншими фазами через контактні закони.

Модель дискретних елементів (DEM) забезпечує відтворення контактних сил та моментів між частинками, між частинками та волокнами, а також між волокнами і стінками сита. Обрані підмоделі для кожної фази наведено в табл. 1, а їхні взаємодії – у табл. 2.

Таблиця 1 – Обрані підмоделі фаз чисельного моделювання

Фаза	Обрана модель	Призначення
Частинки матеріалу	Частинки DEM, суцільна, постійна густина, змішані частинки	Відтворення руху та взаємодій частинок різної форми та розмірів у полі сита
Волокна щітки	Частинки DEM, суцільна, гнучке волокно (послідовно з'єднані циліндричні сегменти), постійна густина	Моделювання гнучких волокон із врахуванням осевої та згинальної жорсткості, коливань та демпфування

Таблиця 2 – Обрані підмоделі взаємодії фаз чисельного моделювання

Взаємодія	Модель	Призначення
Волокно – волокно	Лінійна пружина, сила кочення	Відтворення пружної деформації та тертя між сегментами волокон
Волокно – стінка щітки	Лінійна пружина, зв'язок частинка–стінка, сила кочення	Жорсткий контакт волокон із основою щітки
Волокно – стінка сита	Лінійна пружина, сила кочення	Контакти волокон із конструкційними стінками сита
Частинки – частинки	Модель Герца–Міндліна, сила кочення	Взаємодія частинок матеріалу між собою
Волокно – частинки	Лінійна пружина, сила кочення	Контакти волокон із частинками матеріалу
Частинки – стінки	Модель Герца–Міндліна, сила кочення	Контакти частинок із конструкційними стінками сита

Нестационарний неявний розрахунок забезпечує стабільність інтегрування рівнянь руху при високій жорсткості контактів та великій кількості елементів системи, що особливо важливо для моделювання взаємодії гнучких волокон та дрібних частинок у вузьких отворах сита. Час ітерацій складає – 0,001 с, кількість ітерацій за один крок – 5, загальний час моделювання 5 с.

Сила тяжіння включена як обов'язкова зовнішня масова сила для обох фаз, що дозволяє коректно враховувати переміщення частинок та волокон під дією власної ваги та взаємодії з конструкцією системи.

Інтерполяція рішення використовується для прискорення обчислень та згладжування результатів при великій кількості контактів і фазових взаємодій.

Фізико-механічні властивості фаз моделювання (частинок і волокон) та їхні взаємодії між собою, стінками області і сита наведені в табл. 3.

За результатами аналізу попередніх досліджень як основні фактори (табл. 4) було обрано:

- відношення кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху, N_{bx} ;
- відносний розмір частинок K_{po} , як відношення меншого діаметра частинки матеріалу d_p до геометричного розміру отвору сита D_o :

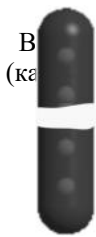
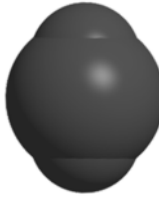
$$K_{po} = \frac{d_p}{D_o}; \quad (1)$$

- швидкість переміщення щітки V_b ;
- кут нахилу щітки відносно сита γ , °.

Кількість волокон щітки вздовж напрямку її руху (N_{bx}) визначає густину контакту волокон із поверхнею сита та частинками матеріалу, що безпосередньо

впливає на інтенсивність очищення та рівномірність зняття налиплих частинок. Відносний розмір частинок K_{po} характеризує можливість проходження або затримання частинок у отворах, а також визначає ефективність самоочищення сита. Швидкість переміщення щітки V_b впливає на кінетичну енергію взаємодії волокон з частинками та ситом, що визначає як інтенсивність очищення, так і можливі пошкодження робочої поверхні. Кут нахилу щітки відносно сита γ визначає орієнтацію векторів контактних зусиль між волокнами і поверхнею сита. При зміні цього кута змінюється не лише глибина проникнення волокон у отвори сита, а й напрямок реакції при ковзанні, що впливає на характер очищення (зміщувальний, зішкрібальний або комбінований). Оптимальний кут забезпечує максимальну ефективність видалення частинок при мінімальному навантаженні на волокна та поверхню сита. Таким чином, обрані фактори є найбільш значущими з точки зору впливу на ефективність процесу очищення сита щіткою та забезпечують можливість комплексної оцінки механізму взаємодії волокон із частинками матеріалу.

Таблиця 3 – Фізико-механічні властивості фаз моделювання та їхні взаємодії

Фаза / взаємодія	Властивість / параметр	Значення
 Волокно (капрон)	Число сегментів волокна	20
	Довжина волокна, м	0,05
	Діаметр волокна, м	0,001
	Щільність частинок, кг/м ³	1140
	Модуль Юнга, МПа	3000
	Коефіцієнт Пуассона	0,35
	Коефіцієнт статичного тертя	0,25
	Коефіцієнт опору кочення	0,1
	Коефіцієнт відскоку	0,1
	Жорсткість пружного елемента, Н/м	10 ⁶
 Частинка	Відносні координати центрів сфер і їх радіуси:	
	– сфера 1	(0; 0; 0,5); r = 0,7
	– сфера 2	(0; 0; 0); r = 1
	– сфера 3	(0; 0; -0,5); r = 0,7
	Щільність частинок, кг/м ³	600
	Модуль Юнга, МПа	15
	Коефіцієнт Пуассона	0,2
	Коефіцієнт статичного тертя	0,53
	Коефіцієнт відскоку	0,1
Стінка області (сталь)	Щільність, кг/м ³	7800
	Модуль зсуву, Па	7,9×10 ¹⁰
	Коефіцієнт Пуассона	0,3
Конструкційна стінка сита (капрон)	Щільність, кг/м ³	1140
	Модуль зсуву, Па	3000
	Коефіцієнт Пуассона	0,35
Волокно та стінка (сталь)	Коефіцієнт статичного тертя	0,48
	Коефіцієнт тертя кочення	0,05
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,1
Частинка та стінка (сталь)	Коефіцієнт статичного тертя	0,554
	Коефіцієнт тертя кочення	0,05
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,1
Волокно та стінка сита (капрон)	Коефіцієнт статичного тертя	0,25
	Коефіцієнт тертя кочення	0,05
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,1
Частинка та стінка сита (капрон)	Коефіцієнт статичного тертя	0,62
	Коефіцієнт тертя кочення	0,05
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,1

Таблиця 4 – Рівні варіювання факторів чисельного моделювання

Рівень	Кут нахилу щітки $\gamma, ^\circ$	Відношення кількість волокон щітки вздовж її руху N_{bx}	Відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po}	Швидкість переміщення щітки $V_b, \text{м/с}$
Кодування	x_1	x_2	x_3	x_4
Нижній (–1)	–30	1	1,05	0,4
Нижній (0)	0	5	1,10	1,2
Верхній (+1)	30	9	1,15	2,0
Інтервал	30	4	0,05	0,8

У якості критеріїв досліджень визначалися:

- кількість частинок, що пройшли через сито – N_{gi} ;
- кількість частинок, що залишилися на поверхні сита – N_{gu} ;
- кількість частинок, що зійшли з поверхні сита – N_{gd} .

Для оцінювання ефективності процесу очищення за отриманими показниками обчислювалися відповідні частки (рис. 3):

- частка частинок, що пройшли крізь сито:

$$\varepsilon_{gi} = 100 \frac{N_{gi}}{N_{gi} + N_{gu} + N_{gd}}; \quad (2)$$

- частка частинок, що залишилися на ситі:

$$\varepsilon_{gu} = 100 \frac{N_{gu}}{N_{gi} + N_{gu} + N_{gd}}; \quad (3)$$

- частка частинок, що зійшли з поверхні:

$$\varepsilon_{gd} = 100 \frac{N_{gd}}{N_{gi} + N_{gu} + N_{gd}}. \quad (4)$$

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити ефективність очищення сита щіткою, визначити оптимальні умови роботи та виявити вплив конструктивних і кінематичних параметрів на розподіл частинок у процесі.

Моделювання проводилось за схемою повнофакторного чисельного експерименту, що передбачає варіювання всіх обраних факторів на заданих рівнях з урахуванням їх можливого взаємного впливу. Такий підхід дозволяє повністю оцінити вплив кожного параметра на ефективність процесу очищення сита. Загальна кількість дослідів $3^4 = 81$. Число повторювань кожного дослідів – 3.

Візуалізацію динаміки системи «сито – частинки матеріалу – щітка» наведено на рис. 4. На зображенні представлено послідовність взаємодії волокон щітки з частинками матеріалу на поверхні сита, що дає змогу простежити процес очищення отворів, переміщення та розподіл частинок у часі.

Регресійний аналіз результатів чисельного моделювання проводився у середовищі Wolfram Cloud, яке забезпечує широкі можливості для математичної обробки експериментальних та модельних даних. Для опису отриманих залежностей між досліджуваними факторами та критеріями відгуку застосовано функцію NonlinearModelFit, що дозволяє побудувати нелінійну регресійну модель, визначити її параметри та оцінити якість апроксимації. За допомогою функцій ParameterTable і FitCurvatureTable виконано детальний аналіз статистичних характеристик отриманої моделі – стандартних похибок параметрів, t-статистик, коефіцієнтів детермінації та кривизни поверхні відгуку. Для перевірки адекватності побудованої моделі та значущості окремих факторів використано критерії Стюдента (для оцінювання

коефіцієнтів рівняння регресії) і критерій Фішера (для оцінювання загальної адекватності моделі).

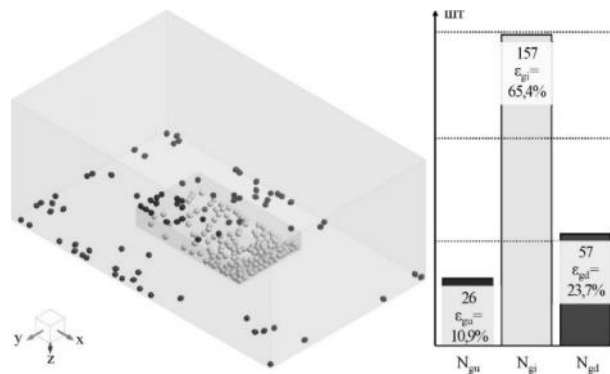


Рисунок 3 – Результат взаємодії в системі «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

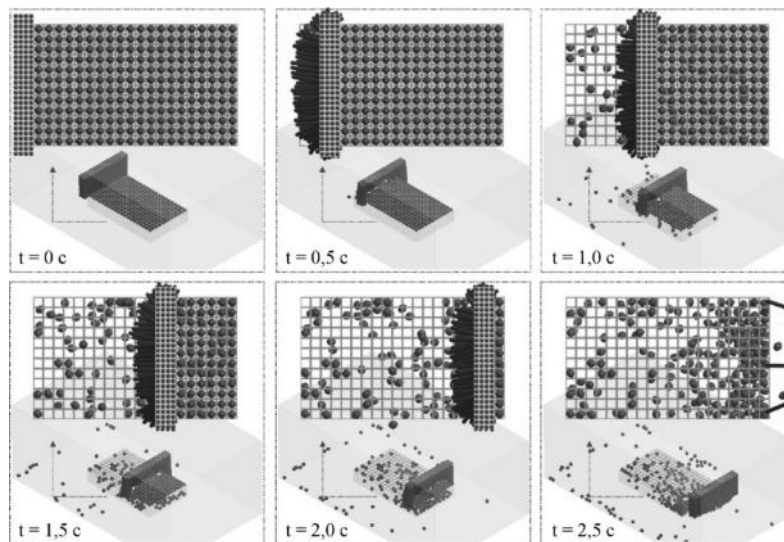


Рисунок 4 – Візуалізацію динаміки системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

На основі результатів чисельного моделювання та подальшої статистичної обробки даних отримано рівняння регресії другого порядку для таких критеріїв відгуку:

– частка частинок, що залишилися на ситі (рис. 5):

$$\varepsilon_{gu} = 3,2309 - 0,356443 \gamma + 35,7037 K_{po} - 7,2169 N_{bx} + 0,01678 \gamma N_{bx} + 0,386921 N_{bx}^2 + 21,6759 V - 6,67245 V_b^2; \quad (5)$$

– частка частинок, що зійшли з поверхні (рис. 6):

$$\varepsilon_{gd} = -3078,21 + 2,14451 \gamma - 0,00881687 \gamma^2 + 5513,39 K_{po} - 1,81481 \gamma K_{po} - 2442,96 K_{po}^2 - 10,3512 N_{bx} + 13,0556 K_{po} N_{bx} - 0,24456 N_{bx}^2 - 2,34491 V_b; \quad (6)$$

– частка частинок, що пройшли крізь сито (рис. 7):

$$\varepsilon_{gi} = 100 - \varepsilon_{gu} - \varepsilon_{gd} = 3174,98 - 1,78806 \gamma + 0,00881687 \gamma^2 - 5549,09 K_{po} + 1,81481 \gamma K_{po} + 2442,96 K_{po}^2 + 17,5681 N_{bx} - 0,0167824 \gamma N_{bx} - 13,0556 K_{po} N_{bx} - 0,142361 N_{bx}^2 - 19,331 V_b + 6,67245 V_b^2. \quad (7)$$

Критерій Фішера для рівняння (5) становить 163,33, а для рівняння (6) – 138,82, що значно перевищує табличне значення 1,96. Це підтверджує статистичну адекватність отриманих рівнянь.

Сума констант і коефіцієнтів у трьох рівняннях дає умовний баланс 100% (логічно для часток розподілу частинок). Це означає, що моделі сумісні й описують розподіл однієї й тієї ж множини частинок між трьома станами: пройшли крізь сито (ϵ_{gi}), залишились на ситі (ϵ_{gu}) і зійшли з поверхні сита (ϵ_{gd}). Тому позитивний вплив фактора на одну частку, як правило, супроводжується від'ємним ефектом на одну або дві інші.

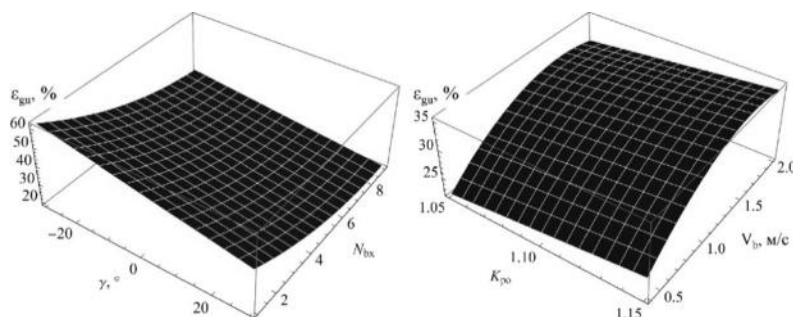


Рисунок 5 – Залежність зміни частки частинок ϵ_{gu} , що залишаються на ситі, від кута нахилу щітки γ , відносної кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху N_{bx} , відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po} та швидкості переміщення щітки V_b
Джерело: розроблено авторами

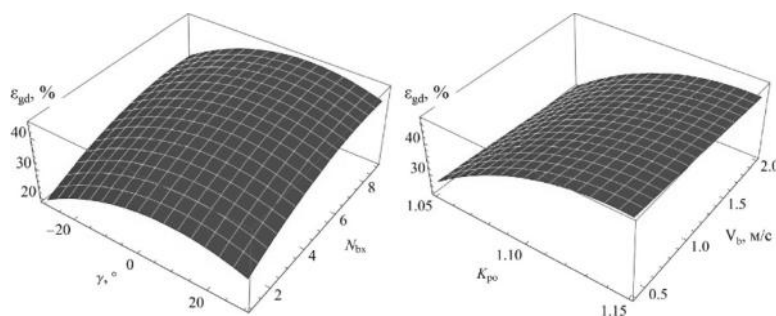


Рисунок 6 – Залежність зміни частки частинок ϵ_{gd} , що зійшли з поверхні, від кута нахилу щітки γ , відносної кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху N_{bx} , відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po} та швидкості переміщення щітки V_b
Джерело: розроблено авторами

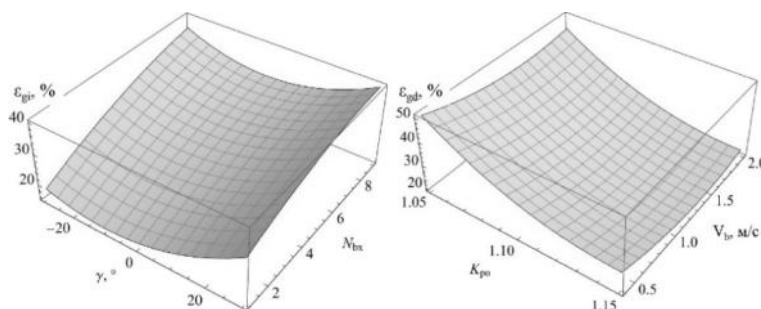


Рисунок 7 – Залежність зміни частки частинок ϵ_{gi} , що пройшли крізь сито, від кута нахилу щітки γ , відносної кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху N_{bx} , відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po} та швидкості переміщення щітки V_b
Джерело: розроблено авторами

Вплив відносного розміру частинки K_{po} . Збільшення відносного розміру частинки у рівнянні для ϵ_{gu} призводить до зростання частки матеріалу, що залишається на ситі. Коли розмір частинки стає порівняним або перевищує розмір отвору, ймовірність її проходження зменшується – частинка частіше застрягає або заклинюється. У рівнянні ϵ_{gi} збільшення K_{po} знижує частку частинок, що пройшли крізь

сито. У рівнянні ε_{gd} присутній великий позитивний лінійний і значний від'ємний квадратичний коефіцієнт, що свідчить про виражену нелінійність: при початковому зростанні K_{po} частка частинок, що сходять із поверхні ε_{gd} , збільшується – це можна пояснити тим, що частинки, які не щільно застрягають, вибиваються щіткою. Проте при подальшому зростанні K_{po} квадратичний член починає домінувати, і ε_{gd} зменшується через надмірне блокування великих частинок у комірках. Таким чином, існує критична межа K_{po} , після якої спостерігається переважання ефекту заклинювання.

Вплив кількості волокон уздовж напрямку руху N_{bx} . У рівнянні ε_{gu} коефіцієнт при N_{bx} має від'ємне значення, а квадратичний – додатне. Це означає, що збільшення кількості волокон спочатку зменшує частку матеріалу, який залишається на ситі, тобто густіша щітка ефективніше очищує отвори. Проте за надмірного збільшення N_{bx} ефект насичується – надлишкова густина знижує ефективність очищення. У рівнянні ε_{gi} лінійний коефіцієнт позитивний, тобто збільшення N_{bx} підвищує частку частинок, що проходять крізь сито. У рівнянні ε_{gd} збільшення N_{bx} зменшує частку частинок, що сходять із поверхні, однак взаємодія з K_{po} змінює цей ефект – при більших K_{po} вплив N_{bx} може посилювати сходження частинок. З фізичної точки зору, більша кількість волокон забезпечує інтенсивніший контакт із частинками, збільшуючи частоту зіткнень і шанс витіснення частинок із отворів. Водночас надмірна густина волокон може ускладнювати виведення матеріалу з-під щітки, що пояснює наявність квадратичної залежності.

Вплив кута нахилу щітки γ . Коефіцієнт при γ у рівнянні ε_{gu} має невелике значення, що вказує на помірний вплив кута на процес. Зі збільшенням кута нахилу частка матеріалу, що залишається на ситі, незначно зменшується. У рівняннях ε_{gd} та ε_{gi} присутні як лінійні, так і квадратичні члени з малими коефіцієнтами, що свідчить про слабку, але нелінійну залежність. Взаємодія з параметром K_{po} показує, що зміна кута впливає на ефективність очищення через зміну напрямку сил тертя та зсуву. Кут нахилу визначає співвідношення нормальних і тангенціальних складових сили, що діє на частинку при контакті з волокном, і впливає на проникнення ворсини в отвір та ефект «зскрібання». Помірне нахилення покращує очищення, тоді як занадто великий кут може знизити ефективність за рахунок зменшення сили натискання.

Вплив швидкості переміщення щітки V_b . У рівнянні ε_{gu} лінійний і квадратичний члени мають протилежні знаки, що утворює опуклу параболу — існує оптимальна швидкість, при якій частка частинок, що залишаються на ситі, максимальна. У рівнянні ε_{gi} залежність має форму U-подібної кривої: мінімум ε_{gi} відповідає максимуму ε_{gu} . При надто малих або надто великих швидкостях частка частинок, що проходять, зростає. У рівнянні ε_{gd} відсутній квадратичний термін — швидкість має переважно лінійний вплив: зі збільшенням V_b частка частинок, що сходять, зменшується. Фізично це пояснюється тим, що при вищих швидкостях частинки швидше викидаються або видаляються з робочої зони, проте через інерційні ефекти частина з них може відлітати в приймач. Оптимальна швидкість визначає баланс між кінетичною енергією волокон та стабільністю контакту: надмірна швидкість викликає коливання, відскоки і зниження рівномірності очищення. Згідно з моделлю, оптимальна швидкість щітки становить приблизно $V_b = 1,4\text{--}1,6$ м/с, при якій спостерігаються екстремальні значення — максимальна частка залишених і мінімальна частка пройдених частинок. Для підвищення ефективності проходження доцільно працювати поза цим діапазоном — або при нижчих, або при вищих швидкостях, залежно від мети (підвищення чи очищення).

Найбільш впливовим фактором є відносний розмір частинки (K_{po}), який визначає характер взаємодії з отворами сита. Для підвищення пропускної здатності сита слід зменшувати K_{po} (тобто зменшувати розмір частинок або збільшувати отвори). Щільність волокон N_{bx} сприяє ефективнішому очищенню, однак має межу ефективності. Швидкість щітки V_b вимагає оптимізації в межах стабільного режиму,

тоді як кут нахилу γ забезпечує можливість тонкого регулювання динаміки контакту між волокнами і частинками, впливаючи на інтенсивність очищення поверхні.

Висновки. Виконано комплексне чисельне моделювання процесу очищення сита щіткою в середовищі Simcenter Star-CCM+, що дозволило відтворити просторову взаємодію між елементами системи «сито – частинки матеріалу – щітка» та визначити закономірності впливу конструктивних і кінематичних параметрів на ефективність очищення. Застосування моделі дискретних елементів (DEM) у поєднанні з Лагранжевою багатофазною постановкою забезпечило адекватне описання контактної взаємодії гнучких волокон із частинками матеріалу та стінками конструкції, а використання нестационарного неявного розрахунку гарантувало стабільність і точність чисельного інтегрування.

За результатами багатофакторного моделювання визначено вплив чотирьох основних параметрів – кута нахилу щітки γ , відносного розміру частинок K_{po} , кількості волокон уздовж напрямку руху N_{bx} і швидкості переміщення V_b – на три ключові показники: частку частинок, що пройшли крізь сито ε_{gi} (7), залишилися на ситі ε_{gu} (5) та зійшли з його поверхні ε_{gd} (6). Отримані рівняння регресії дозволили кількісно оцінити взаємозв'язок факторів. Встановлено, що збільшення швидкості руху щітки і зменшення кута її нахилу сприяють інтенсифікації процесу очищення, тоді як зростання відносного розміру частинок призводить до підвищення їх залишкової кількості на ситі. Виявлено нелінійну залежність між параметрами системи, що зумовлює існування оптимальних поєднань геометричних і кінематичних характеристик, при яких досягається максимальна ефективність очищення без пошкодження поверхні сита та волокон щітки.

Список літератури

1. Katarzyna L., Remigiusz M., Piotr W. Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*. 2016. Vol. 18. Article number 13. DOI: 10.1007/s10035-016-0622-4
2. Feder S., Keska W., Wlodarczyk K. Pneumatic aiding of the process of screening granular mixtures using a screening table. *Agric. Eng.* 2008. Vol. 4(102). P. 263–270.
3. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Нестеренко О.В., Молокост Л.А. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 50. С. 52–58. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.52-58
4. Olshansky V.P., Bredykhin V.V., Lukyanenko V.M., Piven M.V., Slipchenko M.V., Kharchenko S.O. Theory of grain separation: *monograph*. Kharkiv. 2017. 802 p.
5. Olshanskyi V.P., Slipchenko M.V., Olshanskyi O.V., Bredykhin V.V. Dynamics of pulse-loaded nonlinear oscillators: *monograph*. Kharkiv. 2022. 262 p.
6. Simcenter. Simcenter STAR-CCM+ 2210 released: What's new? [Electronic resource]. – Access mode: https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/simcenter-star-ccm-2210-released-whats-new/?utm_source=chatgpt.com
7. Qiu Z., Xiao Q., Yuan H., Han X., Li C. Particle shape and clogging in fluid-driven flow: A coupled CFD-DEM study. *Powder Technology*. 2024. Vol. 437. 119566. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119566
8. Zhao Z., Wu M., Jiang X. A Review of Contact Models' Properties for Discrete Element Simulation in Agricultural Engineering. *Agriculture*. 2024, Val. 14. 238. DOI: 10.3390/agriculture14020238
9. Shevchenko I., Aliiev E. Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. 2018. Vol. 12, Is. 4. P. 135–142. DOI: 10.15673/fst.v12i4.1209
10. Shen J., Wheeler C., Ilic D., Chen J. Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling. *Powder Technology*. 2019. Vol. 357. P. 171–185. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.068.
11. Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieve—a numerical study using the DEN simulation. *Powder Technol.* 2003. Val. 133. P. 190–203. DOI: 10.1016/S0032-5910(03)00092-5
12. Bi Y., Song Q., Zhu J., Feng J., Dong J., Zhao P., Huang Y., Fu Z., Zhou J. 2024. Performance of elastic ball screen-cleaning device based on DEM-MBD coupling simulation. *Particuology*. Vol. 93. P. 247–263. DOI: 10.1016/j.partic.2024.07.003
13. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: *Аграрна наука*. 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
14. Boset L. D., Wako A., Zewdie B. Determination of Terminal Velocity of Some Agricultural Grain Using Ansys Rocky DEM - CFD Coupling Simulation. *Science Development*. 2023. Vol. 4(2). P. 28–35. DOI: 10.11648/j.scidev.20230402.12
15. Devpalli D., Mayavaram R., Singh N., Wollschlager J. Challenges in implementing fiber-fiber interaction in a discrete element method analysis of fiber orientation. *Conference: SPE ANTEC 2024At*: St Louis.

References

1. Katarzyna, L., Remigiusz, M., & Piotr, W. (2016). Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*, 18, Article 13. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0622-4>.
2. Feder, S., Keska, W., & Wlodarczyk, K. (2008). Pneumatic aiding of the process of screening granular mixtures using a screening table. *Agric. Eng.*, 4(102), 263–270.
3. Vasylykovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., Nesterenko, O. V., & Molokost, L. A. (2020). Development toward the concept of the "ideal" sieve of a grain separator. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 50, 52–58. doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58 [in Ukrainian].
4. Olshansky, V. P., Bredykhin, V. V., Lukyanenko, V. M., Piven, M. V., Slipchenko, M. V., & Kharchenko, S. O. (2017). *Theory of grain separation* (Monograph, 802 p.). Kharkiv.
5. Olshansky, V. P., Slipchenko, M. V., Olshansky, O. V., & Bredykhin, V. V. (2022). *Dynamics of pulse-loaded nonlinear oscillators* (Monograph, 262 p.). Kharkiv.
6. Simcenter. (n.d.). *Simcenter STAR-CCM+ 2210 released: What's new?* Retrieved from blogs.sw.siemens.com/simcenter/simcenter-star-ccm-2210-released-whats-new/?utm_source=chatgpt.com.
7. Qiu, Z., Xiao, Q., Yuan, H., Han, X., & Li, C. (2024). Particle shape and clogging in fluid-driven flow: A coupled CFD-DEM study. *Powder Technology*, 437, 119566. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119566>.
8. Zhao, Z., Wu, M., & Jiang, X. (2024). A review of contact models' properties for discrete element simulation in agricultural engineering. *Agriculture*, 14, 238. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020238>.
9. Shevchenko, I., & Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12(4), 135–142. <https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1209>.
10. Shen, J., Wheeler, C., Ilic, D., & Chen, J. (2019). Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling. *Powder Technology*, 357, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.068>.
11. Li, J., Webb, C., Pandiella, S. S., & Campbell, G. M. (2003). Discrete particle motion on sieve – A numerical study using the DEM simulation. *Powder Technol.*, 133, 190–203. [doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00092-5).
12. Bi, Y., Song, Q., Zhu, J., Feng, J., Dong, J., Zhao, P., Huang, Y., Fu, Z., & Zhou, J. (2024). Performance of elastic ball screen-cleaning device based on DEM-MBD coupling simulation. *Particuology*, 93, 247–263. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.07.003>.
13. Aliiev, E. B. (2023). *Chyselne modeliuvannia protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva* (340 p.). Kyiv: Ahrarna nauka. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in Ukrainian].
14. Boset, L. D., Wako, A., & Zewdie, B. (2023). Determination of terminal velocity of some agricultural grain using Ansys Rocky DEM-CFD coupling simulation. *Science Development*, 4(2), 28–35. <https://doi.org/10.11648/j.scidev.20230402.12>.
15. Devpalli, D., Mayavaram, R., Singh, N., & Wollschlager, J. (2024). Challenges in implementing fiber-fiber interaction in a discrete element method analysis of fiber orientation. *SPE ANTEC 2024 Conference Proceedings*, St. Louis.

Elchyn Aliiev, Prof., DSc., Illia Lytvynov

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Numerical Simulation of the «Sieve – Material Particles – Brush» System

A comprehensive numerical simulation of the sieve cleaning process using a brush was carried out in Simcenter Star-CCM+, which allowed detailed reproduction of the spatial interaction between the elements of the «sieve – material particles – brush» system and identification of the effects of design and kinematic parameters on cleaning efficiency. The application of the Discrete Element Method (DEM) combined with a Lagrangian multiphase approach provided an accurate representation of the contact interaction between flexible bristles, material particles, and the sieve walls, while the use of an unsteady implicit solver ensured stability and high accuracy of numerical integration.

Multifactor simulations determined the influence of four main parameters – brush inclination angle γ , relative particle size K_{po} , number of bristles along the motion direction N_{bx} , and brush velocity V_b – on three key performance criteria: the fraction of particles passing through the sieve (ε_{gi}), remaining on the surface (ε_{gu}), and removed from it (ε_{gd}). The obtained second-order regression equations showed high adequacy according to Student's and Fisher's criteria, confirming the reliability of the numerical model.

It was established that increasing the brush velocity and decreasing its inclination angle enhance the cleaning process, while larger relative particle size increases the likelihood of particles remaining on the sieve. A nonlinear interaction between factors was revealed, indicating the existence of optimal combinations of geometric and kinematic parameters that maximize cleaning efficiency without damaging the bristles or the sieve surface.

numerical simulation, DEM, brush, sieve, material particles, cleaning efficiency

Одержано (Received) 11.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

Andrii Babii, Prof., DSc., **Bohdan Blashchak**

Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil, Ukraine

e-mail: avbabiyntnu@gmail.com

Justification of the Parameters of the Soil Preparation Module of the Potato Planting Machine

This work presents a substantiation of the parameters of the soil preparation module in a potato planting machine system, which is used for strip milling and primary covering of potato seeds. The proposed methodology allows describing the geometric and kinematic parameters of the milling drum blade, whose knife is formed by several sections, determining initial conditions and modeling the flight trajectories of soil chips. It also covers their interaction with the guiding casing surface, considering either reflection or sliding of soil particles into the target zone for primary covering of potato seeds. Based on the conducted analysis, an analytical expression for the shape of the casing is proposed, which, when interacting with soil chips, meets the requirement of directing soil particles into the target seed row zone.

potato seed, soil chips, planting, strip milling, parameters, modeling, analysis, guiding casing, flight trajectory, grinding, loosening

Problem statement. Potato production in Ukraine is largely concentrated in small private farms. This indicates a significant need for the development of effective small-scale mechanization tools. In most cases, the technological process of potato production remains poorly mechanized. For example, the issues of soil preparation for forming a seedbed for potato planting, as well as the mechanized planting process itself, are still underdeveloped. The low level of resource provision in such farms often leads to violations of proper crop cultivation technologies. As a result, potato yields in these farms are significantly lower compared to those of larger producers, where production technologies and resource availability are at a higher level. Therefore, one of the priority tasks of agricultural machinery development is the development of our own line of machines for potato production specifically tailored to these small-scale farms, which ensure the majority of Ukraine's gross potato collection.

The aim of this study is to justify the parameters of individual units of a combined potato planting machine. This research focuses on the study of the design and kinematic parameters of the milling module of the potato planter. This module, performing strip milling, is intended to prepare the soil for forming the potato seedbed and to initially cover the planted seed with loosened soil discharged from under the milling cutter's knife.

Analysis of recent research and publications. At present, many researchers tend to agree and confirm that strip milling during potato planting is a promising method of soil preparation. Specifically, strip milling of the row zone to the depth of potato planting promotes the formation of an appropriate clod structure, enabling the coulter to create an optimal planting bed and thus improving the conditions for plant development. Moreover, this approach allows for significant energy savings during milling, as only the furrow formation zone is cultivated [2, 4, 5, 9, 11].

In studies [1, 3, 6–8], the authors demonstrate the agrotechnical efficiency of high-quality soil preparation, particularly strip milling, prior to potato planting and compare the results with traditional soil preparation methods. The obtained results have a direct positive impact on increasing potato yield. Other studies [10, 12, 13] indicate that a combined potato planting machine, which integrates soil preparation with simultaneous planting and fertilization, is effective. This approach significantly reduces the number of field passes and ensures optimal planting conditions.

In works [3] and [4], the interaction of working bodies with both the soil and the potato seeds is elaborated, with constructive and kinematic parameters substantiated. These studies emphasize the high effectiveness of milling for subsequent furrow formation. However, issues related to modeling the trajectory of soil chip movement, its interaction with the guiding casing, and the initial covering of potato seeds with soil remain insufficiently developed.

The analysis of the literature confirms that these issues are highly relevant and require scientific solution.

Statement of the task. The aim of the study is to justify constructive and kinematic parameters of the milling module of the potato planting machine in order to ensure its functions of soil loosening and grinding, along with the primary covering of potato seed in the opened furrow.

Presentation of the main material. The use of strip milling in the potato planting unit is intended to grind and loosen the surface soil layer to the depth of seed placement. Moreover, the quality of planting depends on the type of soil that covers the seed. Therefore, the idea behind combining working elements in the potato planting unit is to ensure that the soil chips initially partially cover the potatoes in the furrow formed by the coulter. This can be achieved by installing a protective casing on the milling drum. Its function is to deflect and direct the soil chips, produced by the milling blades, into the open furrow. The second stage of seed covering involves forming a small ridge using passive coverers from the soil within the milled strip, followed by final ridge shaping with hilling shares using soil from the inter-row space [1, 7, 8].

This study considers the first stage of potato seed covering – by soil chips formed during the operation of the milling drum.

To model the operation of an individual blade of the milling drum, it is first necessary to define its geometric parameters. The blade has an L-shaped profile and consists of i segments of length L_i , which, together with the milling drum radius R , form corresponding angles β_i . Such blades (both right- and left-curved) are mounted on the milling drum, which rotates with an angular velocity ω_b .

The milling drum performs compound motion: it rotates about its own axis in the horizontal plane (relative motion) and simultaneously moves forward with the machine (translational motion). Thus, a specific point on the blade generates a position vector $\vec{r}$ with respect to the axis of drum rotation. The initial position of the selected blade point has coordinates $(x_0(t); y_0)$, where $x_0(t) = V_m t$ (V_m is the translational speed of the machine and t is time).

Therefore, the coordinates of an arbitrary point on the cutting edge of the blade in parametric form can be expressed as:

$$\begin{cases} x(t) = x_0(t) + (L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 + L_3 \cos \beta_3) \cos \omega_b t; \\ y(t) = y_0 + (L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 + L_3 \cos \beta) \sin \omega_b t, \end{cases} \quad (1)$$

where $\omega_b t$ is the rotation angle of the blade point on the drum, measured from the horizontal axis of the rectangular coordinate system;

$L_1 \cos \beta_1, L_2 \cos \beta_2, L_3 \cos \beta_3$ are the projections of the blade segments onto the radius R of the drum, connecting the considered point of the blade to the axis of rotation.

The trajectory of the absolute motion of the blade point is the geometric sum of the horizontal and vertical components of displacement (Fig. 1).

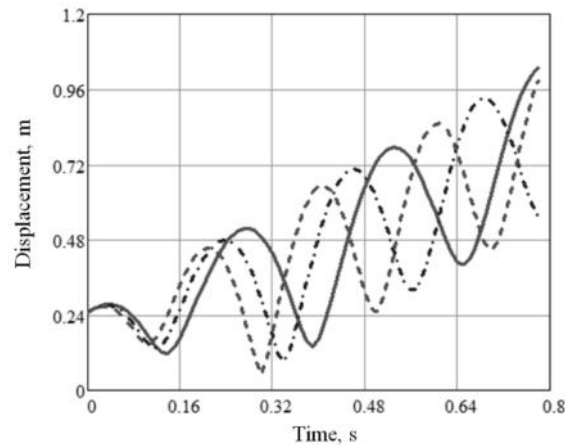


Figure 1 – Trajectory of the absolute motion of the blade point at varying angular velocities
Source: developed by the authors

For the numerical calculation, the following parameters are assumed: the radius of the milling drum $R = 0.25$ m; its rotation frequency is tabulated within the range of 230 to 300 rpm (the solid line corresponds to $\omega_b = 24.09$ rad/s; the dash-dotted line – $\omega_b = 27.75$ rad/s; the dashed line – $\omega_b = 31.42$ rad/s.); the forward speed of the machine $V_m = 0.5$ m/s.

To analyze the considered process, it is first necessary to examine the kinematic parameters of an individual milling's blade during operation.

If equations (1) describe the spatial position of a blade point, then the velocity vector of the blade's contact point with the soil is determined by the following expression:

$$\vec{g} = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

By taking the time derivatives t of expressions (1), we obtain the components of the blade point velocity in expanded form:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = V_m - \omega_b \sin(\omega_b t) (L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 + L_3 \cos \beta_3); \\ \dot{y}(t) = \omega_b \cos(\omega_b t) (L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 + L_3 \cos \beta_3). \end{cases} \quad (3)$$

The change in the absolute velocity of the blade point is also characterized by the geometric sum of its horizontal and vertical components

$$g_n = \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2}. \quad (4)$$

It is now necessary to analyze the behavior of a soil particle that moves freely after detaching from the blade edge. This motion can be considered as a free flight of a particle projected at an angle.

The initial velocity of the particle as it leaves the blade can be generally represented by the following expression:

$$g_0 = k g_n, \quad (5)$$

where $k \in [0.5, 0.9]$ is the coefficient characterizing the energy transfer from the blade to the particle, which depends on the soil properties. In this study, we assume $k = 0.8$.

Since no additional constraints are applied in this model yet, the particle's flight trajectory will initially be analyzed using the classical equations of projectile motion at an angle to the horizontal [3]:

$$x_{\alpha}(t) = x_{0\alpha} + \mathcal{G}_{0\alpha} \cdot \cos \alpha \cdot t; \quad (6)$$

$$y_{\alpha}(t) = y_{0\alpha} + \mathcal{G}_{0\alpha} \cdot \sin \alpha \cdot t - 0.5gt^2, \quad (7)$$

where $x_{0\alpha}$, $y_{0\alpha}$ are the coordinates of the particle's initial detachment point from the blade;
 α is the particle's launch angle ($t = t_{0\alpha}$)

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)}\right) \quad (8)$$

From a kinematic point of view, the detachment point will be considered as the moment when the blade exits the soil while operating at a working depth h (we assume $h = 0.06$ m).

Based on this, it is necessary to find the position of the milling drum $\varphi_{0\alpha} = \omega_b t_{0\alpha}$ or the time $t_{0\alpha}$ at which the considered point is at the soil surface boundary. This position corresponds to the initial coordinates of the soil particle's launch – ($x_{0\alpha}; y_{0\alpha}$).

It is advisable to determine this position using the relationship that connects the central angle θ of a circle with radius R (the trajectory of the blade point) to the height h (the millage depth) of the segment formed by this circle.

The central angle θ in this case will be given by

$$\theta = 2 \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right). \quad (9)$$

Then, half the length of the chord of this segment, which corresponds to the horizontal displacement of the blade, will be equal to

$$x_h = R \sin \frac{\theta}{2}. \quad (10)$$

Based on the first equation in (1), we write the expression to determine the time $t_{0\alpha}$

$$t_{0\alpha} = \frac{1}{\omega_{b\alpha}} \arccos\left(\frac{x_h}{R}\right), \quad (11)$$

where $\omega_{b\alpha}$ is the angular velocity of the milling drum, which determines the time when the blade exits the soil at the given working depth h .

The coordinates of the detachment point will be:

$$x_{0\alpha} = R \cos(2\pi - \omega_{b\alpha} t_{0\alpha}); \quad (12)$$

$$y_{0\alpha} = R \sin(2\pi - \omega_{b\alpha} t_{0\alpha}). \quad (13)$$

The obtained coordinates of the detachment point depend on the blade position, considering that it exits the soil in the fourth quadrant of the coordinate axis at the working depth h .

The detachment angle of the particle is denoted by $2\pi - \omega_b t_{0\alpha} = \varphi_{0\alpha}$.

The components of the initial velocity will be determined at the blade position corresponding to the particle launch:

$$\mathcal{G}_{x0\alpha} = -\omega_b R \sin \varphi_{0\alpha}; \quad (14)$$

$$\mathcal{G}_{y0\alpha} = \omega_b R \cos \varphi_{0\alpha}. \quad (15)$$

In general, the moment when the blade reaches the soil surface is characterized by the velocity $\mathcal{G}_0$ – the initial velocity of the particle's flight at an angle α to the horizontal, denoted as $\mathcal{G}_{0\alpha}$. This velocity is the geometric sum of the horizontal and vertical components of velocity at time $t_{0\alpha}$

$$\mathcal{G}_{0\alpha} = k \sqrt{\dot{x}(t_{0\alpha})^2 + \dot{y}(t_{0\alpha})^2}. \quad (16)$$

To determine the angle α at which the particle is ejected, expression (8) can be rewritten in the form

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\dot{y}(t_{0\alpha})}{\dot{x}(t_{0\alpha})} \right) \quad (17)$$

Having obtained the value of the angle α , the horizontal and vertical components of displacement during the free flight of a soil particle ejected from under the milling's blade can be expressed based on relations (6) and (7). The graphical interpretation of the trajectory components of the particle's free flight is shown in Fig. 2.

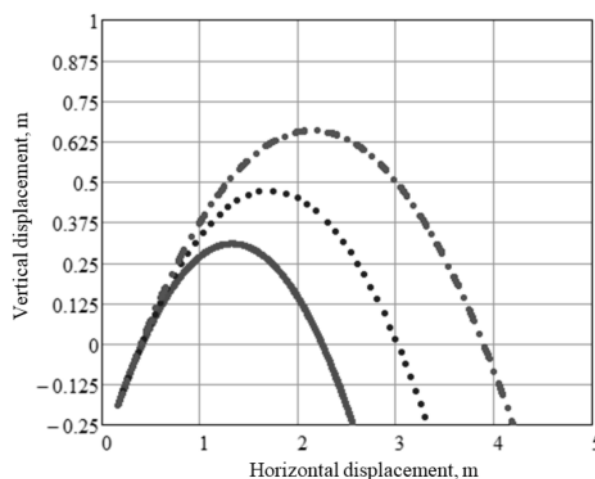


Figure 2 – Trajectories of free flight of soil chips

Source: developed by the authors

Thus, at this stage of the study, the main dependencies characterizing the free flight of a soil particle - soil chips during the operation of the milling drum were established and free flight trajectories were constructed at a given frequency of rotation of the working body.

Returning to the main objective of the work – the possibility of covering potato seed with the formed soil chips – we summarize the process as follows:

- soil moves along a parabolic trajectory after leaving the blade;
- particles collide with a protective casing having a radius of curvature R_k , centered at coordinates x_{0k}, y_{0k} ;
- after impact with the casing, a particle either rebounds or slides down, falling at a certain landing point x_f .

Therefore, it is necessary to select the shape and placement of the protective casing such that the majority of the scattered or reflected soil particles fall into the zone of the potato seed placement, that is

$$x_f \in [x_k - \delta, x_k + \delta], \quad (18)$$

here, x_k denotes the coordinate of the potato seed placement and $\pm \delta$ represent the boundaries of the soil covering zone.

The next stage of the study is to determine the behavior of the particle after collision with the guiding protective casing.

The collision between the soil particle and the casing occurs at the moment when

$$y_\alpha(t) = f(x(t)). \quad (19)$$

Using condition (19), the collision time is determined.

The subsequent trajectory of the particle depends on the point of curvature of the casing where the collision occurs.

Upon impact with the curved surface of the casing, the velocity vector decomposes into two components:

the normal component

$$\vec{g}_n = (\vec{g} \cdot \vec{n}) \vec{n}; \quad (20)$$

the tangential component

$$\vec{g}_t = \vec{g} - \vec{g}_n, \quad (21)$$

where $\vec{n}$ is the unit normal vector to the surface at the point of impact.

Then, after the collision, the particle will have a new velocity determined by the expression

$$\vec{g}_s = -e \vec{g}_n + \mu \vec{g}_t, \quad (22)$$

where e is the coefficient of restitution, characterizing the elasticity of the impact, which ranges between $e \in [0, 1]$;

μ is the coefficient of friction of the soil chips on the surface of the casing.

If the velocity after rebound is insufficient to form a new parabolic flight trajectory, the particle simply falls off or slides along the casing surface.

Its acceleration will be

$$\frac{d\vec{g}_s}{dt} = g \sin \theta_k - \mu g \cos \theta_k, \quad (23)$$

where θ_k is the local inclination angle of the casing at the point.

If we analyze the process of covering the planted potato in the furrow, it is continuous. The cutting and falling of soil chips occur constantly, as the machine moves in translational motion. Soil covers not only the planted seed but also fills the furrow opened by the coulter.

Therefore, the outlined problem can ultimately be reduced to verifying the curvature and placement of the guiding casing by setting the condition of ideal reflection of a soil particle from its surface at a given moment in time and directing it into the target zone. This is done to prevent the particle from returning after reflection back into the milling zone.

Particles that do not meet the condition of ideal reflection will slide down the casing surface, which physically guides them into the furrow.

This means that the geometry of the casing must prevent the particle from reflecting backward and instead direct it into the target zone. Considering a local moment in time, the reflected particle that reaches the furrow level should have coordinates $[x_k - \delta, y_k]$, that is, its new trajectory must pass through this point.

Therefore, it is advisable to consider the inverse problem: to find the position of the section of the casing curve such that the contact points of the scattered flight trajectories of the soil chips, upon reflection, fall within the target zone.

To this end, we will analyze the initial conditions for forming the trajectory of the reflected particle's motion.

Let us find the collision point of a particle moving along a parabolic trajectory with a casing of given curvature:

$$\begin{cases} x_\alpha(t) = x_{0\alpha} + \vartheta_{0\alpha} \cdot \cos \alpha \cdot t; \\ y_\alpha(t) = y_{0\alpha} + \vartheta_{0\alpha} \cdot \sin \alpha \cdot t - 0.5gt^2; \\ y(t) = f(x(t)). \end{cases} \quad (24)$$

Based on system (24), we derive a nonlinear equation with respect to time t

$$y_{0\alpha} + \vartheta_{0\alpha} \cdot \sin \alpha \cdot t - 0.5gt^2 = f(x_{0\alpha} + \vartheta_{0\alpha} \cdot \cos \alpha \cdot t). \quad (25)$$

Its solution is most easily implemented using a numerical method, but first, it is necessary to define the curve describing the cross-section of the casing.

The most practical function may be a polynomial curve, for example, of the third degree

$$y(t) = f(a_3x(t)^3 + a_2x(t)^2 + a_1x(t) + a_0), \quad (26)$$

where a_i are the coefficients that define the specified curvature on the designated segments of the polynomial curve ($i = 0...3$).

The root of equation (25), taking into account (26), will be the time $t = t_K$ corresponding to the moment and point of collision, that is $K = (x(t_K), y(t_K))$.

The tangent to the curve (26) at point K is given by its derivative

$$f'(x) = \frac{dy}{dx} = 3a_3x^2 + 2a_2x + a_1. \quad (27)$$

Relation (27) expresses the slope of the tangent at any point x on the casing.

The tangent angle at point K is

$$\theta_i = \arctg(f'(x_K)), \quad (28)$$

accordingly, the angle of the normal is

$$\theta_n = \theta_t + \frac{\pi}{2}. \quad (29)$$

Then, given the known velocity at point K is $\vec{g}_K = (g_x, g_y)$, the angle of its motion will be

$$\theta_K = \arctg 2(g_x, g_y). \quad (30)$$

In the problem statement, it was assumed that the particle undergoes ideal reflection – corresponding to the trajectory with the maximum possible deviation, where the particle can reflect toward the milling zone. In this case, the reflection angle of the particle at point K will be

$$\theta'_K = 2\theta_n - \theta_K. \quad (31)$$

The obtained values of the reflection θ'_K , the velocity at point K and its coordinates serve as the initial conditions for the particle's flight trajectory after reflection until it lands on the soil surface. The trajectory construction can be performed using relations analogous to (6) and (7).

Analyzing the obtained flight trajectories of the particle (Fig. 2), it is evident that the segments before collision with the casing have an almost linear character. Based on this and using relation (26), a first approximation of the casing shape can be obtained that satisfies the condition of targeted guidance of soil chips (Fig. 3).

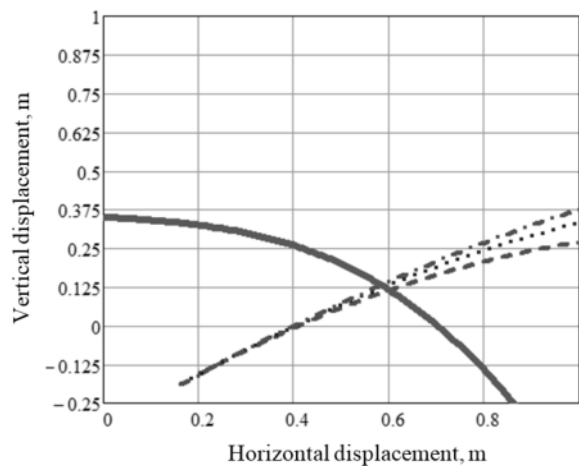


Figure 3 – Graphical dependencies for the study of the casing shape

Source: developed by the authors

In Fig. 3, the dash-dot line, the dotted line formed by points and the dashed line represent the flight trajectories of the soil particle corresponding to those in Fig. 2, while the thick solid line depicts the curve describing the shape of the casing.

The analytical expression for the casing curve is given by

$$y(x) = -0.78x^3 - 0.034x^2 - 0.089x + 0.35. \quad (32)$$

Adjusting the coefficients a_i or even using higher-order polynomials, allows selecting a shape of the casing curve or its segment that ensures directing the soil chips into the target zone. This means that, with such an approach, it is possible to achieve the effect of primary covering of potato seeds during strip milling in the design of a potato planting machine.

Conclusions. The presented methodology allows for describing the geometric and kinematic parameters of the milling drum blade, which is formed by several segments; determining the ejection point of soil chips from under the blade, taking into account the working depth; modeling the flight trajectory of soil chips with given initial velocity and launch angle; investigating the range of trajectory dispersion under various parameters and identifying the points and angles of interaction between soil particles and the guiding casing.

A polynomial function is proposed to describe the casing curve, where adjusting the coefficients ensures the specified curvature over certain segments. This approach enables combining theoretical solutions with practical implementation in the physical design of a potato planting machine.

The process of particle interaction with the casing is described, including reflection, sliding, and falling off. The dependencies of the tangent line at a given point on the casing curve are formulated, and based on this, the reflection angle of the particle upon collision with the casing is determined.

For the physical design of the milling module of the potato planting machine, parameters of the casing curve have been established that allow reflecting and directing soil chips into the target zone for the primary covering of potato seeds. The achieved effect in this numerical experiment can be obtained for the given design and kinematic parameters of the milling module using the following coefficients of the polynomial curve (26) for the casing: $a_3 = -0.78$; $a_2 = -0.034$; $a_1 = -0.089$; $a_0 = 0.35$.

List of References

1. Babii A., Blashchak B. Study of the performance efficiency parameters of a potato planting machine. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2025. Vol. 118, № 2. P. 117–127.
2. Li J., Sun W., Wang H., Wang J., Simionescu P. A. An integrated potato-planting machine with full-film mulching and ridged row soil covering. *Agriculture*. 2024. 14, 860. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060860>.
3. Wang J., Liao M., Xia H., Chen R., Li J., Li J., Yang J. Study on a novel reseeding device of a precision potato planter. *Agriculture*. 2024. 14, 1824. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101824>.
4. Zheng Z., Fu Z., Wang C., Huang Y., He J. Design and experimental research on soil covering device with linkage and differential adjustment of potato planter. *Agriculture*. 2021. 11, 665. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070665>.
5. Zheng Z., Zhao H., Liu Z., He J., Liu W. Research progress and development of mechanized potato planters: A review. *Agriculture*. 2021. 11, 521. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060521>.
6. Zhou B., Li Y., Zhang C., Cao L., Li C., Xie S., Niu Q. Potato planter and planting technology: A review of recent developments. *Agriculture*. 2022. 12, 1600. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101600>.
7. Блащак Б. О., Бабій А. В. Обґрунтування окремих конструктивно-технологічних параметрів картоплесадильної машини. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. 1. С. 192–199.
8. Блащак Б. О., Бабій А. В. Спосіб утворення борозенки та зароблення насіння картоплі при гребневому способі посадки. *Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. (Тернопіль, 6–7 грудня 2023)*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. С. 94–95.
9. Грушецький С. М. Інноваційна картопляна техніка – комплексне рішення задач. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: міжвід. наук.-техн. зб.* 2009. Вип. 39. С. 68–81.
10. Дідух В. Ф., Тарасюк В. В., Тарасюк Д. В. Дослідження садильного апарату картоплі пасивного типу. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.* Луцьк. 2020. Вип. 44. С. 41–50.
11. Думич В. Аналіз конструкцій для садіння картоплі. *Техніка і технології АПК*. 2012. № 12(39). С. 10–13.
12. Ляшук В. М., Дідух В. Ф., Герасимик-Чернова Т. П., Бартошик І. С. Особливості формування врожаю картоплі. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.* Луцьк. 2019. Вип. 42. С. 49–55.
13. Томчук В. В. Картоплесаджалка для пророслих бульб. *Механізація сільськогосподарського виробництва. Промислова гідравліка і пневматика*. 2017. № 4 (58). С. 54–57.

References

1. Babii, A., & Blashchak, B. (2025). Study of the performance efficiency parameters of a potato planting machine. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 118(2), 117–127.
2. Li, J., Sun, W., Wang, H., Wang, J., & Simionescu, P. A. (2024). An integrated potato-planting machine with full-film mulching and ridged row soil covering. *Agriculture*, 14, 860. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060860>.
3. Wang, J., Liao, M., Xia, H., Chen, R., Li, J., Li, J., & Yang, J. (2024). Study on a novel reseeding device of a precision potato planter. *Agriculture*, 14, 1824. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101824>.

4. Zheng, Z., Fu, Z., Wang, C., Huang, Y., & He, J. (2021). Design and experimental research on a soil-covering device with linkage and differential adjustment for potato planters. *Agriculture*, 11, 665. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070665>.
5. Zheng, Z., Zhao, H., Liu, Z., He, J., & Liu, W. (2021). Research progress and development of mechanized potato planters: A review. *Agriculture*, 11, 521. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060521>.
6. Zhou, B., Li, Y., Zhang, C., Cao, L., Li, C., Xie, S., & Niu, Q. (2022). Potato planter and planting technology: A review of recent developments. *Agriculture*, 12, 1600. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101600>.
7. Blashchak, B. O., & Babii, A. V. (2024). Substantiation of separate structural and technological parameters of a potato planting machine. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41), Part 1, 192–199 [in Ukrainian].
8. Blashchak, B. O., & Babii, A. V. (2023). Method of forming furrows and embedding potato seed under ridge planting technology. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii: zbirnyk tez dopovidei XII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Ternopil, 6–7 December 2023), 94–95. [in Ukrainian].
9. Hrushchyskiy, S. M. (2009). Innovative potato machinery – a comprehensive technical solution. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 39, 68–81. [in Ukrainian].
10. Didukh, V. F., Tarasiuk, V. V., & Tarasiuk, D. V. (2020). Study of a passive-type potato planting mechanism. *Silskohospodarski mashyny: zbirnyk naukovykh statei (Lutsk)*, 44, 41–50. [in Ukrainian].
11. Dumych, V. (2012). Analysis of potato planting machine designs. *Tekhnika i tekhnolohii APK*, 12(39), 10–13. [in Ukrainian].
12. Liashuk, V. M., Didukh, V. F., Herasymuk-Chernova, T. P., & Bartoshyk, I. S. (2019). Features of potato yield formation. *Silskohospodarski mashyny: zbirnyk naukovykh statei (Lutsk)*, 42, 49–55. [in Ukrainian].
13. Tomchuk, V. V. (2017). Potato planter for sprouted tubers. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva. Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, 4(58), 54–57. [in Ukrainian].

А. В. Бабій, проф., д-р техн. наук, **Б. О. Блашак**

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

Обґрунтування параметрів модуля підготовки ґрунту картоплепосадочної машини

У статті наведено обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів модуля підготовки ґрунту у складі картоплепосадочної машини, що здійснює смугове фрезерування та забезпечує первинне присипання насіння картоплі. Розроблено методику, яка дозволяє описати геометричні та кінематичні характеристики фрезерного барабана з ножами складної форми, визначати початкові умови вильоту ґрунтової стружки, моделювати її траєкторію руху та взаємодію з поверхнею направляючого кожуха. Встановлено аналітичну залежність для опису кривизни кожуха, яка забезпечує спрямування ґрунтових частинок у цільову зону, де розміщене насіння.

Актуальність роботи зумовлена потребою у підвищенні рівня механізації процесів садіння картоплі в умовах дрібних фермерських та приватних господарств України, де сконцентровано значну частину валового виробництва картоплі. Підвищення якості посадки та забезпечення необхідної структури ґрунту у зоні розміщення насіння є важливою умовою для отримання високих урожаїв.

У роботі показано, що смугове фрезерування є енергоощадною та агротехнічно доцільною технологією підготовки ґрунту при посадці картоплі. Проте для досягнення ефекту первинного присипання насіння ґрунтовою стружкою, необхідно враховувати не лише конструкцію ножа, а й характер руху частинок ґрунту після їх вильоту. Тому у роботі запропоновано модель, яка дозволяє визначати координати та кінематичні характеристики ґрунтових частинок при їх зіткненні з направляючим кожухом, а також умови їх подальшого руху – відбивання, осипання чи ковзання.

Розроблений підхід дає можливість забезпечити раціональну форму кожуха, що виконує функцію перенаправлення ґрунтової стружки у цільову зону борозни. Загалом, комбінування різних модулів в одному агрегаті дозволяє об'єднати процеси підготовки ґрунту, посадки з підживленням, початкового та остаточного прикривання насіння в одному технологічному проході, що підвищує ефективність та якість посадки.

насіння картоплі, ґрунтова стружка, посадка, смугове фрезерування, параметри, моделювання, аналіз, направляючий кожух, траєкторія польоту, подрібнення, розпушення

Одержано (Received) 11.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 621.86

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.175-187](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.175-187)**О. Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук, **В. З. Гудь**, доц., д-р техн. наук,**А. Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук, **С. М. Паньків***Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: Oleglashuk@ukr.net*

Обґрунтування технологічних і конструктивно-кінематичних параметрів гнучкого гвинтового конвеєра

У статті наведено обґрунтування технологічних і розрахункових конструктивно-кінематичних параметрів гнучкого гвинтового конвеєра (ГГК) з умови міцності його конструкції. Запропоновано нову конструкцію секції ГГК з розширеними технологічними можливостями, що забезпечують зменшення радіуса кривизни траєкторії транспортування матеріалу, а також підвищення їхньої ефективності порівняно з відомими, зменшення енергоспоживання та збільшення висоти підйому транспортування сипучих матеріалів. Основну увагу приділено вибору варіанту конструкції гвинтового робочого органу (ГРО), яка буде залежати від характеру виконання транспортно-технологічного процесу, що регламентує види навантаження на основний елемент конструкції ГРО – гвинт, або від конструктивних особливостей спіралі та кожуха ГРО. Встановлено, що при виборі діаметра гвинта ГГК за постійного значення кроку витків гвинта з умови міцності конструкції за наявних деформаційних процесів значення максимальних дотичних напружень не повинні перевищувати допустимі дотичні напруження для матеріалу гвинта.

гнучкий гвинтовий конвеєр, процес, амплітуда, продуктивність, потужність, силові параметри, шнек, сипучий матеріал, кожух

Постановка проблеми. Транспортування сипучих вантажів криволінійними та комбінованими траєкторіями за допомогою гнучких гвинтових робочих елементів, закритих у гнучкому кожусі, забезпечує високу мобільність під час виконання технологічних процесів завантаження та розвантаження та розширює їх технологічні можливості порівняно із звичайними гвинтовими конвеєрами.

Однак існуючі гнучкі гвинтові робочі елементи не повністю відповідають експлуатаційним вимогам до таких типів конвеєрів. Секційні робочі елементи характеризуються складністю конструкції та технологією їх виготовлення, високою матеріаломісткістю, що призводить до збільшення енергоспоживання, пошкодження внутрішньої поверхні гнучких кожухів та матеріалів, що піддаються транспортуванню.

Тому розроблення нових конструкцій гнучких шарнірних шнекових робочих елементів з розширеними технологічними можливостями, що забезпечують зменшення радіуса кривизни, а також підвищення їхньої ефективності порівняно з відомими, зменшення енергоспоживання та збільшення висоти підйому транспортування сипучих матеріалів є важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибір варіанту конструкції гвинтового робочого органу (ГРО) буде залежати в основному від характеру виконання транспортно-технологічного процесу, який регламентує види навантаження на основний елемент конструкції ГРО – гвинт, або від конструктивних особливостей спіралі та кожуха ГРО. Принцип вибору конструкції гнучкого гвинтового конвеєра (ГГК) в основному зводиться до пошуку альтернативних конструкцій, які забезпечують необхідну міцність та оптимальну собівартість ГРО [1]. Обґрунтування технологічних і розрахункових конструктивно-кінематичних параметрів ГГК на першому етапі проведемо з умови міцності його конструкції.

Основи проектування та дослідження гвинтових конвеєрів були закладені вченими [1, 2-6]. Поряд зі шнеками, які є частиною складних сільськогосподарських машин [3, 4], для транспортування зерна зараз використовується велика кількість гвинтових транспортерів. Вони мають надзвичайно просту конструкцію та характеризуються малими розмірами і надійністю в експлуатації. Розроблено технологічні схеми можливих способів транспортування сипучого вантажу в передавальній гілці та виготовлено її експериментальний зразок [5, 8, 9].

У роботах [14-15, 16] розглянуто особливості використання гвинтових конвеєрів для транспортування та/або підйому сипучих матеріалів на короткі та середні відстані. Описано вплив таких робочих характеристик, як швидкість обертання шнека, кут нахилу шнекового конвеєра та об'єм заповнення сипучим матеріалом на ефективність роботи шнекового конвеєра. Розглянуто робочі умови, що впливають на ефективність шнекового конвеєра, за допомогою методу дискретних елементів (МДЕ) для моделювання однопотокового шнекового конвеєра з періодичними граничними умовами.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесу транспортування сипучого вантажу між робочими пристроями в передавальній гілці [19]. У роботах [13, 17-18] представлено математичні моделі процесу завантаження шнекового конвеєра. Використання запропонованих моделей дозволяє розробляти нові конструкції шнекових конвеєрних пристроїв та обґрунтовувати їх раціональні параметри.

У роботах [9-10, 11-12] розглянуто режим роботи похилого шнекового конвеєра, який має робочий елемент шнека з постійними параметрами. Кінематику завантаження зерна досліджено на основі рівнянь руху в шнековому конвеєрі [20-21]. Проаналізовано рух завантаження в режимі постійної високої швидкості.

Постановка завдання. Для переміщення та транспортування сипких сільськогосподарських матеріалів по криволінійних трасах та траєкторіях запропоновано конструкцію секції гнучкого гвинтового конвеєра, розрахункову схему якої наведено на рисунку 1.

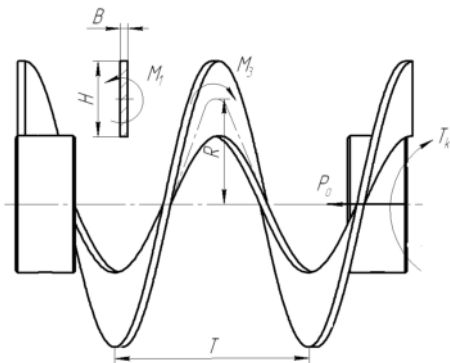


Рисунок 1 – Розрахункова схема секції гнучкого гвинтового конвеєра

Джерело: розроблено авторами

Секції ГГК відносяться до нежорстких деталей, тому для забезпечення їх ефективної роботи є необхідним розрахунок їх на жорсткість під час переміщення різних матеріалів при відповідних зовнішніх навантаженнях: крутному моменті та осьовій силі. Умову міцності конструкції визначимо шляхом розрахунку на жорсткість його конструкції, яку проведемо за рахунок дослідження деформації секції гнучкого гвинтового конвеєра.

Нехай на секцію ГГК діє поздовжня осьова сила P_o (рис. 1). Для лінійної деформації секції ГГК міцність конструкції буде визначатися двома критеріями:

- умовою міцності під час розтягу, яка для поперечного перерізу забезпечується за умови, коли найбільше напруження σ_{max} не перевищує допустимого напруження

$[\sigma_{\text{дон}}]$, або

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_o}{S_n} \leq [\sigma_{\text{дон}}], \quad (1)$$

де S_n – площа поперечного перерізу.

При цьому

$$[\sigma_{\text{дон}}] = \frac{\sigma_{\text{гран}}}{[n]} \leq \frac{P_o}{S_n}, \quad (2)$$

де $\sigma_{\text{гран}}$ – граничні напруження, за яких відбувається руйнування секції; $[n]$ – допустимий, або мінімально необхідний коефіцієнт запасу міцності;

- умовою міцності під час кручення секції ГГК, яке виникає за рахунок її обертання з кутовою швидкістю Ω та яка для поперечного перерізу забезпечується за умови, коли найбільше дотичне напруження τ_{max} при крученні не перевищує допустимого напруження $[\tau_{\text{дон}}]$, або

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_k}{W_p} = \sqrt{\frac{M_1^2}{W_{px}^2} + \frac{M_3^2}{W_{pz}^2}} \leq [\tau_{\text{дон}}], \quad (3)$$

де M_k – крутний момент, який прикладений до секції ГГК;

W_p – полярний момент опору перерізу.

При цьому

$$[\tau_{\text{дон}}] = \frac{\tau_m}{[n]}, \quad (4)$$

де τ_m – границя текучості матеріалу при крученні.

На першому етапі визначимо технологічні та конструктивно-кінематичні параметри ГГК з умови міцності під час розтягу згідно із записами (1) і (2).

Відомо, що

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_o}{S_n} = E \frac{\Delta l}{l} = Ee \leq [\sigma_{\text{дон}}], \quad (5)$$

де E – модуль Юнга матеріалу ГРО під час розтягу; Δl – модуль зміни довжини зразка під час відносної деформації; l – довжина зразка, що деформується; e – величина відносної деформації, або відносне видовження.

При цьому

$$E = \frac{P_o / S_n}{\Delta l / l} = \frac{P_o l}{S_n \Delta l}; \quad \Delta l = l_1 - l, \quad (6)$$

де l_1 – довжина зразка після деформації.

Тоді для деформації витка секції спіралі ГГК можна записати

$$E = \frac{P_o / S_e}{\Delta l / l} = \frac{P_o R}{S_n \Delta R} = \frac{P_o R}{BH \Delta R}. \quad (7)$$

Враховуючи, що $J_p = HB^3 \xi$ підставимо значення ΔR у формулу (7), при цьому після скорочення та перетворення виразу, отримаємо

$$E = \frac{P_o R \left(-R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right) GB^2 \xi}{(T_k \sin \alpha + P_o \cos \alpha) \left[\left(R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)^2 + \Delta TR \frac{T}{2\pi^2} \right]}. \quad (8)$$

Підставивши значення E з (8) у формулу (5), отримаємо залежність для визначення допустимих максимальних напружень σ_{max} , які виникають під час деформації витка спіралі ГГК

$$\sigma_{max} = \frac{P_o}{S_n} = \frac{P_o \Delta R \left(-R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right) GB^2 \xi}{(T_k \sin \alpha + P_o R \cos \alpha) \left[\left(R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)^2 + \Delta TR \frac{T}{2\pi^2} \right]} \leq [\sigma_{don}]. \quad (9)$$

При цьому складові залежності (9) ΔR і ΔT згідно з (8) будуть визначатися:

$$\Delta R = \frac{M_1}{GJ_p} \frac{\left[\left(R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)^2 + (T - T_o) R \frac{T}{2\pi^2} \right]}{-R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2}} =$$

$$= \frac{(T_k \sin \alpha + P_o R \cos \alpha) \left[\left(R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)^2 + (T - T_o) R \frac{T}{2\pi^2} \right]}{GHB^3 \xi \left(-R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)}; \quad (10)$$

$$\Delta T = \frac{(T_k \sin \alpha + P_o R \cos \alpha) E \left(256\pi^8 R^6 - 64\pi^5 R^4 T^2 (\pi - 1) + 4\pi^2 R^2 T^4 - T^6 \right)}{4GHB^3 \xi E \pi^2 \left(32\pi^5 R^4 + 4\pi^2 R^2 T^2 (\pi - 1) + T^4 \right)} +$$

$$+ \frac{12G\xi (T_k \cos \alpha - P_o R \sin \alpha) \left(-256\pi^7 R^5 T - 16\pi^3 R T^3 (8\pi^2 R^2 + T^2) + T^4 \right)}{4GHB^3 \xi E \pi^2 \left(32\pi^5 R^4 + 4\pi^2 R^2 T^2 (\pi - 1) + T^4 \right)}. \quad (11)$$

Згідно з формулами (11) та (12) побудовано залежності зміни радіуса ΔR та кроку ΔT середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра під час навантаження (рис. 2).

На основі аналізу залежностей (рис. 2) встановлено, що зміна радіуса ΔR середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра під час навантаження осьовою силою P_o змінюється залежно від зміни радіуса R від 50 до 100 мм і зміни кроку від 30 до 50 мм.

За окремого збільшення радіуса R , або кроку T за відповідного постійного значення, відповідно, кроку T або радіуса R , зміна радіуса середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра під час навантаження осьовою силою P_o також збільшується в середньому на 0,005...0,008 мм.

На основі аналізу залежностей (рис. 3) встановлено, що зміна кроку середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра під час навантаження осьовою силою P_o змінюється в межах від 0,1 до 0,5 мм залежно від зміни радіуса R від 50 до 100 мм і зміни кроку від 30 до 50 мм. За окремого збільшення радіуса R , або кроку T за відповідного постійного значення, відповідно, кроку T або радіуса R , зміна кроку

середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра під час навантаження осьовою силою P_o також збільшується в середньому на 0,15...0,25 мм.

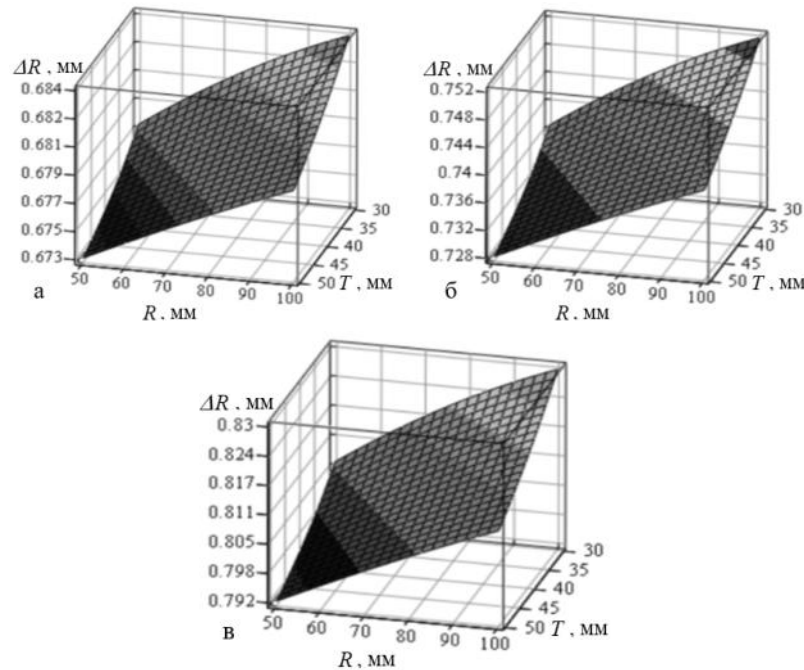


Рисунок 2 – Залежність зміни радіуса середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра як функція

$$\Delta R = f(R; T): \text{а – за значення } T - T_o = 0,2 \text{ мм; б – за значення } T - T_o = 0,4 \text{ мм;}$$

$$\text{в – за значення } T - T_o = 0,6 \text{ мм; } P_o = 50 \text{ Н, } T_k = 1000 \text{ Н·мм, } H = 20 \text{ мм, } B = 2,5 \text{ мм}$$

Джерело: розроблено авторами

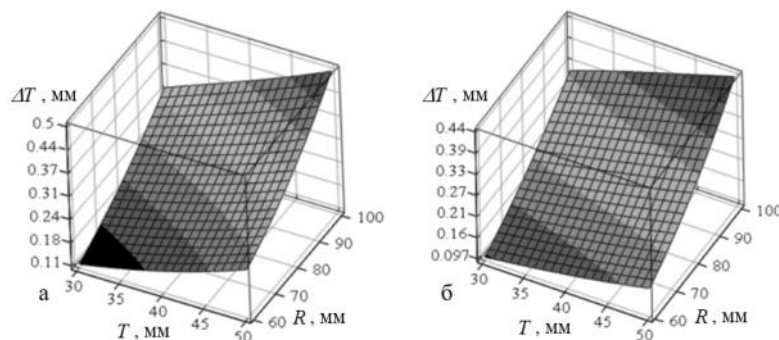


Рисунок 3 – Залежність зміни кроку середньої лінії гвинтового елемента секції конвеєра як функція

$$\Delta T = f(R; T): \text{а – за значення } \xi = 4; \text{б – за значення } \xi = 8; T - T_o = 0,6 \text{ мм; } P_o = 50 \text{ Н, } T_k = 1000 \text{ Н·мм, } H = 20 \text{ мм, } B = 2,5 \text{ мм}$$

Джерело: розроблено авторами

Для обґрунтування конструктивних параметрів гвинтового елемента секції конвеєра під час навантаження осьовою силою P_o побудуємо залежність зміни для визначення максимальних напружень σ_{max} , які виникають під час деформації витка спіралі ГГК.

Підставимо значення зміни радіуса ΔR та кроку ΔT із залежностей (10) та (11) в формулу (9). Для цього в залежностях (10) та (11) виразимо радіус R гвинта через його діаметр D та позначимо їх складові таким чином:

$$T_k \sin \alpha + P_o R \cos \alpha = \mu; \left(-R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)^2 = \eta; \left(R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2} \right)^2 = \lambda;$$

$$(256\pi^8 R^6 - 64\pi^5 R^4 T^2 (\pi - 1) + 4\pi^2 R^2 T^4 - T^6) = \delta;$$

$$(-256\pi^7 R^5 T - 16\pi^3 R T^3 (8\pi^2 R^2 + T^2) + T^4) = \kappa;$$

$$T_k \cos \alpha + P_o \sin \alpha = \theta;$$

$$(32\pi^5 R^4 + 4\pi^2 R^2 T^2 (\pi - 1) + T^4) = \zeta.$$

При цьому, отримаємо:

$$\sigma_{max} = \frac{P_o \Delta R \eta G B^2 \xi}{\mu \left(\lambda^2 + \Delta T R \frac{T}{2\pi^2} \right)} \leq [\sigma_{don}]; \quad (12)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\frac{\mu}{GHB^3 \xi} \left[\lambda^2 + \Delta T (D - d) \frac{T}{4\pi^2} \right] P_o \eta G B^2 \xi}{\mu \left(\lambda^2 + \Delta T (D - d) \frac{T}{4\pi^2} \right)} \leq [\sigma_{don}]; \quad (13)$$

$$\sigma_{max} = \frac{2P_o \left[\lambda^2 + (T - T_0) D \frac{T}{4\pi^2} \right]}{(D - d) B \left(\lambda^2 + \frac{0,5 \mu E \delta D T + 12 G \xi \theta k}{4\pi^4 G (D - d) B^3 \xi^2 E} \right)} \leq [\sigma_{don}]. \quad (14)$$

Згідно з формулою (13) побудовано графічну залежність зміни максимальних напружень як функція $\sigma_{max} = f(P; D)$, яку наведено на рис. 4. При цьому $\Delta R = 0,7$ мм, $\Delta T = 0,3$ мм.

На рис. 5. наведено графічну інтерпретацію двомірного перерізу залежності зміни максимальних напружень як функції $\sigma_{max} = f(P; D)$ згідно з рис. 4.

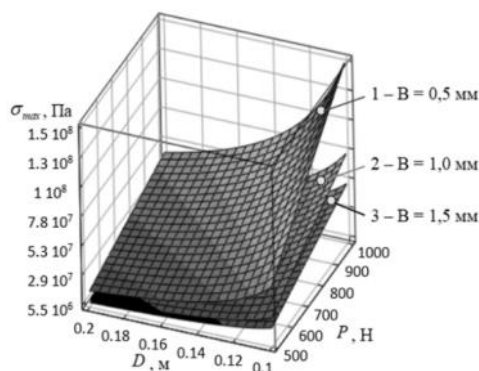


Рисунок 4 – Залежність зміни максимальних напружень як функція $\sigma_{max} = f(P; D)$:

$$T = 50 \text{ мм}; E = 2,05 \cdot 10^5 \text{ МПа}; G = 0,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Джерело: розроблено авторами

Наведена графічна залежність (рис. 5) являє собою номограму, за допомогою якої можна вибирати конструктивні параметри секції ГГК з умови забезпечення її міцності конструкції за наявних деформаційних процесів і допустимого значення напруження на розтяг для сталі 3 рівного $[\sigma_{don}] = 60 \dots 80$ МПа, або $6 \cdot 10^7 \dots 8 \cdot 10^7$ Па.

Визначення конструктивного параметра, або діаметра гвинта D ГГК за постійного значення кроку гвинта $T = 50$ мм відбувається наступним чином.

1. Згідно з даними, що з умови міцності конструкції за наявних деформаційних процесів значення максимального напруження σ_{max} на розтяг для сталі 3 не повинні перевищувати допустимі напруження, або $\sigma_{max} < [\sigma_{дон}] < (6 \cdot 10^7 \dots 8 \cdot 10^7)$ Па.

2. Наприклад, за встановленої поздовжньої осьової сили $P_o = 600 \dots 700$ Н (рис. 5) максимальні напруження σ_{max} за зміни діаметра гвинта ГГК в межах $0,1 \leq D \leq 0,2$ м змінюються в діапазоні від $5,5 \cdot 10^6$ до $1,1 \cdot 10^8$ Па, тобто за значення $P_o = 600$ Н, $D \leq 0,1$ та товщини витка $B \leq 0,5$ мм перевищують допустимих напружень $[\sigma_{дон}]$.

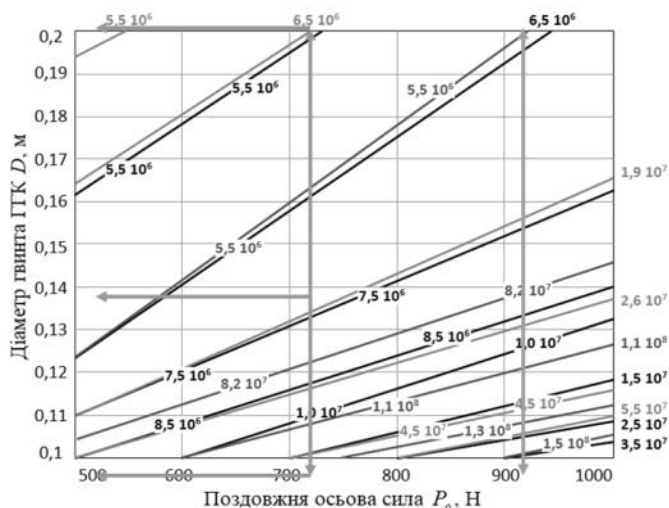


Рисунок 5 – Номограма для визначення діаметра гвинта ГГК залежно від зміни максимальних напружень як функція $\sigma_{max} = f(P; D)$: $T = 50$ мм; $E = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, при значенні поздовжньої осьової сили $P_o = 700$ Н конструктивний параметр, або діаметр гвинта D ГГК повинен бути не менше за 0,1 м, тобто дорівнювати числовому значенню від 0,1 м до 0,2 м за зміни товщини витка B гвинта більшої за 0,5 мм, рис. 4.

3. Наприклад, за встановленої поздовжньої осьової сили $P_o = 900$ Н (рис. 4, рис. 5) максимальні напруження σ_{max} за зміни діаметра гвинта ГГК в межах $0,1 \leq D \leq 0,2$ м змінюються в діапазоні від $5,5 \cdot 10^6$ до $1,5 \cdot 10^8$ Па.

При цьому за значення діаметра гвинта $D \geq 0,12$ м та товщини витка $B = 0,5$ мм максимальні напруження σ_{max} знаходяться в діапазоні більше за значення $6 \cdot 10^7 \dots 8 \cdot 10^7$ до значення $1,5 \cdot 10^8$ Па, тобто перевищують допустимі $[\sigma_{дон}]$.

Таким чином, при значенні поздовжньої осьової сили $P_o = 900$ Н конструктивний параметр, або діаметр гвинта D ГГК повинен бути не менше за 0,12 м, тобто дорівнювати числовому значенню від 0,12 м до 0,2 м за зміни товщини витка B гвинта більшої за 0,5 мм (рис. 4).

Для визначення кроку гвинта T за постійного значення діаметра гвинта $D = \text{const}$ необхідно виконати аналогічні дослідження: побудувати 3D залежність зміни максимальних напружень як функція $\sigma_{max} = f(P; T)$ за встановленого значення діаметра гвинта D ГГК; побудувати двомірні перерізи функціональної залежності $\sigma_{max} = f(P; T)$, які є номограмою зміни максимальних напружень як функція $\sigma_{max} = f(P; T)$; виконати порядок аналізу згідно пп.1-3, які описано вище.

Для одночасного визначення конструктивних параметрів гвинта ГГК також

можна побудувати 3D залежність зміни максимальних напружень як функція $\sigma_{max} = f(P; D)$ за встановленого значення діаметр поперечної осьової сили P_0 та виконати аналогічний порядок аналізу згідно пп.1-3, які описано вище.

Також конструктивні параметри ГГК (діаметр і крок гвинта) та значення поперечної осьової сили P_0 будуть залежати від встановленої (необхідної) продуктивності Q_k ГГК та, відповідно, необхідних затрат споживчої потужності N_k , які взаємопов'язані між собою.

Продуктивність Q_k ГГК може бути визначена за стандартними відомими формулами:

- з врахуванням поперечного перерізу вантажу об'ємною масою ρ_g , який переміщується витками ГГК та значенням зміни діаметра гвинта ΔD , яку визначають за формулою (10) та рис. 2, при цьому $Q_k = 0,25 \left[(D + \Delta D)^2 - d^2 \right] \vartheta \psi_g \rho_g \kappa_3$ (у цьому випадку можна визначити діаметр гвинта);

- за значенням питомого об'єму матеріалу, який приходить на одиницю довжини гвинта, який визначається з врахуванням питомої об'ємної маси матеріалу ρ_2 (кг/м), при цьому $Q_k^* = W_l \vartheta \psi_g \rho_v \phi_z$, де W_l – питомий об'єм матеріалу, який приходить на одиницю довжини шнека, м³/м (у цьому випадку можна визначити крок гвинта за значенням зміни кроку гвинта ΔT , яку визначають за формулою (11)).

При цьому швидкість переміщення вантажу ГГК можна визначити з залежності [2]:

$$\omega - \frac{d\psi}{dt} - \frac{\bar{k}_1 EI}{(\rho_1 + \rho_2)} a^2 = \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{\rho_2}{8\omega(\rho_1 + \rho_2)} \vartheta^2; \quad (15)$$

$$\vartheta = \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\pi^2 \rho_2}}. \quad (16)$$

Тоді:

$$Q_k = 0,25 \left[(D + \Delta D)^2 - d^2 \right] \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\pi^2 \rho_2}} \psi_g \rho_g \kappa_3; \quad (17)$$

$$Q_k^* = W_l \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\pi^2 \rho_2}} \psi_g \rho_v \phi_z. \quad (18)$$

Приймаючи $W_l = \frac{m_g}{\rho_g l} = \frac{V_g \rho_g}{\rho_g l} = \frac{V_g}{l}$, де V_g – об'єм вантажу транспортування (м³), отримаємо

$$Q_k^* = \frac{V_g}{l} \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\pi^2 \rho_2}} \psi_g \rho_v \phi_z. \quad (19)$$

З рівняння (17) визначаємо $D + \Delta D$, тобто:

$$Q_k = 0,25 \left[(D + \Delta D)^2 - d^2 \right] \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\pi^2 \rho_2}} \psi_9 \rho_6 \kappa_3; \quad (20)$$

$$(D + \Delta D)^2 - d^2 = \frac{Q_k}{\frac{0,25}{\pi \rho_2} \sqrt{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}} \psi_9 \rho_6 \kappa_3}; \quad (21)$$

$$(D + \Delta D) = \sqrt{d^2 + \frac{Q_k}{\frac{0,25}{\pi \rho_2} \sqrt{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}} \psi_9 \rho_6 \kappa_3}}. \quad (22)$$

На основі графічного аналізу побудованої залежності згідно з (18) визначаємо числове значення зміни продуктивності ГГК.

Підставляючи значення необхідної заданої продуктивності Q_k^* визначаємо необхідний діаметр гвинта ГГК, за якого буде забезпечуватися задана продуктивність Q_k^* . Умова забезпечення має вигляд: $Q_k \geq Q_k^*$.

Крок гвинта ГГК можна визначити з (18), замінивши V_e через конструктивні розмірні параметри гвинта та кожуха конвеєра.

Перевірку, або підбір необхідного поперечного перерізу, або допустимої поздовжньої осової сили визначають з умов:

$$HB \leq \frac{F_o}{[\sigma_{don}]}; \quad F_o \leq HB [\sigma_{don}]. \quad (23)$$

На другому етапі визначимо кінематичний параметр ГГК з умови міцності конструкції під час кручення секції ГГК, яке виникає за рахунок її обертання з кутовою швидкістю Ω та яка для поперечного перерізу забезпечується за умови (3) з врахуванням викладеного у формулі (4).

Полярний момент опору перерізу W_{px} і W_{py} визначається за формулою

$$W_{px} = \frac{J_x}{R} = \frac{HB^3}{12R}; \quad W_{py} = \frac{J_y}{R} = \frac{HB^3 \xi}{R}. \quad (24)$$

Підставивши значення крутного моменту, який прикладений до витка у площині перпендикулярній до осової лінії витка M_l та згинального моменту M_z , що згинає виток у площині, де вимірюється кривизна K із [3] маємо

$$\tau_{max} = \frac{M_k}{W_p} = \frac{R}{HB^3} \sqrt{(T_k \sin \alpha + P_0 R \cos \alpha)^2 \xi^2 + 12^2 (T_k \cos \alpha - P_0 R \sin \alpha)^2} \leq [\tau_{don}], \quad (25)$$

або

$$\tau_{max} = \frac{D}{2HB^3} \sqrt{(T_k \sin \alpha + 0,5 P_0 D \cos \alpha)^2 \xi^2 + 12^2 (T_k \cos \alpha - 0,5 P_0 D \sin \alpha)^2} \leq [\tau_{don}]. \quad (26)$$

Згідно з формулою (25) побудовано графічну залежність зміни максимальних дотичних напружень як функція $\tau_{max} = f(D; T_k)$, яку наведено на рис. 6. При цьому $P_0 = 750 \text{ Н}$, $H = 20 \text{ мм}$.

На рис. 7. наведено графічну інтерпретацію двомірного перерізу залежності зміни максимальних дотичних напружень як функції $\tau_{max} = f(D; T_k)$ згідно з рис. 6. Графічна залежність (рис. 7) являє собою номограму, за допомогою якої можна вибирати конструктивні параметри секції ГГК з умови забезпечення її міцності конструкції за наявних деформаційних процесів і допустимого значення дотичних напруження на кручення для сталі 3 рівного $[\tau_{don}] = 35 \dots 50 \text{ МПа}$, або $3,5 \cdot 10^7 \dots 5 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

Кінематичний параметр ГГК, або кутову швидкість гвинта Ω (частоту обертання гвинта n_z) можна визначити з умови, за якої

$$\tau_{max} = \frac{M_k}{W_p} = \frac{P}{W_p \Omega} = \frac{30P}{\pi n_z W_p} \leq [\tau_{don}], \quad (27)$$

де P – затрати споживчої потужності, які необхідні для виконання процесу, Вт; n_z – частота обертання гвинта ГГК, рад/с.

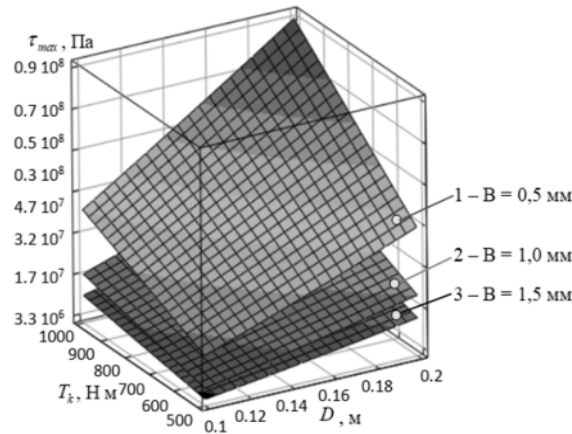


Рисунок 6 – Залежність зміни максимальних дотичних напружень як функція $\tau_{max} = f(D; T_k)$
Джерело: розроблено авторами

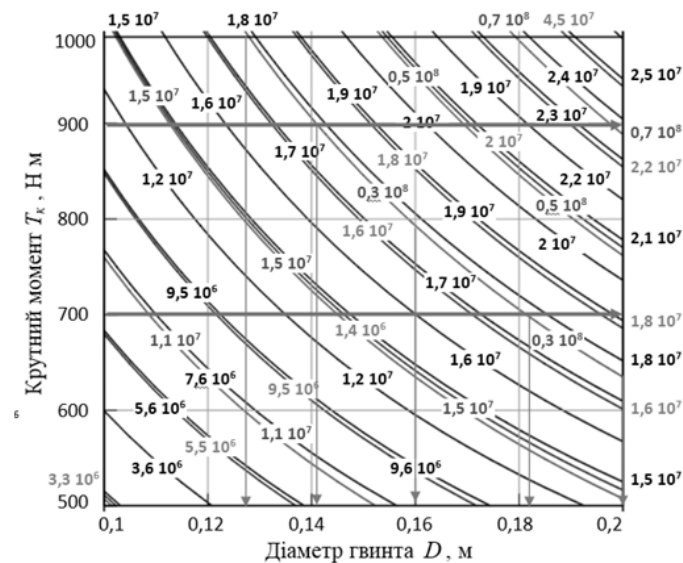


Рисунок 7 – Номограма для визначення діаметра гвинта ГГК залежно від зміни максимальних дотичних напружень як функція $\tau_{max} = f(D; T_k)$: $H = 20$ мм; $P_o = 750$ Н
Джерело: розроблено авторами

При цьому, враховуючи (24) і (27), маємо

$$n_z \geq \frac{30P}{\pi \xi \sqrt{(T_k \sin \alpha + 0.5 P_o D \cos \alpha)^2 \xi^2 + 12^2 (T_k \cos \alpha - 0.5 P_o D \sin \alpha)^2}}. \quad (28)$$

На рис. 8а наведено залежність зміни частоти обертання гвинта ГГК як функція $n_z = f(D; T_k)$, а на рис. 8б – як функція $n_z = f(P)$.

Витрати споживчої потужності P (кВт) розраховують залежно від заданої

продуктивності ГТК за формулою

$$P = Q_k l / 367, \quad (29)$$

де теоретичне значення продуктивності Q_k (т/год) ГТК визначають за формулою (19).

Тоді

$$P = \left(\frac{0,25}{367\pi} [(D + \Delta D)^2 - d^2] \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\rho_2}} \psi_9 \rho_6 \kappa_3} \right) l; \quad (30)$$

$$P^* = \left(\frac{V_6}{367\pi l} \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\rho_2}} \psi_9 \rho_v \phi_z} \right) l. \quad (31)$$

Відповідно, теоретичне значення частоти обертання гвинта ГТК, за якої буде забезпечуватися необхідна продуктивність гвинта можна визначати із залежностей

$$n_z \geq \frac{30 \left(\frac{0,25}{367\pi} [(D + \Delta D)^2 - d^2] \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\rho_2}} \psi_9 \rho_6 \kappa_3} \right) l}{\pi \xi \sqrt{(T_k \sin \alpha + 0,5 P_0 D \cos \alpha)^2 \xi^2 + 12^2 (T_k \cos \alpha - 0,5 P_0 D \sin \alpha)^2}}; \quad (32)$$

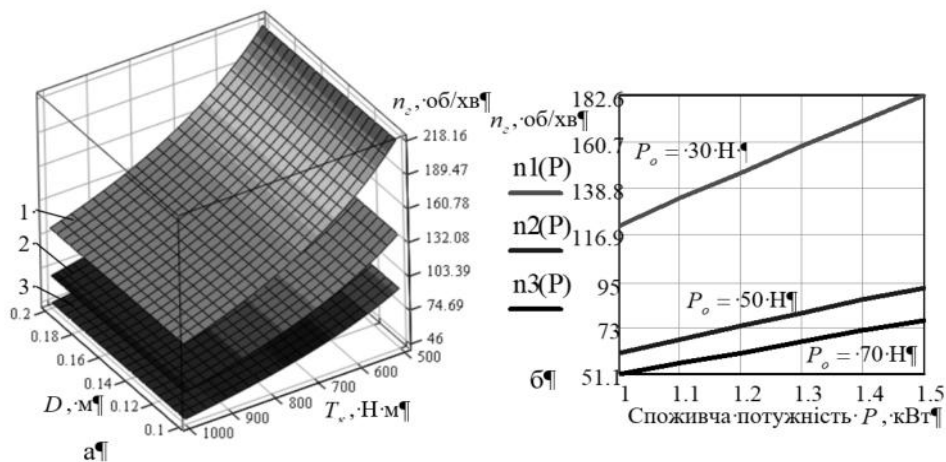


Рисунок 8 - Залежність зміни частоти обертання гвинта ГТК як функція:

а – $n_z = f(D; T_k)$, 1, 2, 3 – відповідно, $P = 1, 0; 1, 2; 1, 5$ кВт; $P_0 = 50$ Н; б – $n_z = f(P)$, $D = 0,15$ м
Джерело: розроблено авторами

$$n_z^* \geq \frac{30 \left(\frac{V_6}{367\pi l} \sqrt{\frac{\omega \left\{ 1 - \pi^2 \rho_2 \left[\frac{d\psi}{dt} (\rho_1 + \rho_2) - a^2 \bar{k}_1 EI \right] 8l^2 \right\}}{\rho_2}} \psi_9 \rho_v \phi_z} \right) l}{\pi \xi \sqrt{(T_k \sin \alpha + 0,5 P_0 D \cos \alpha)^2 \xi^2 + 12^2 (T_k \cos \alpha - 0,5 P_0 D \sin \alpha)^2}}. \quad (33)$$

Висновки. Встановлено, що діаметр гвинта D ГГК за постійного значення кроку гвинта $T = 50$ мм з умови міцності конструкції за наявних деформаційних процесів значення максимального дотичного напруження $\tau_{\max}$ на розтяг для сталі 3 не повинні перевищувати допустимі дотичні напруження, або $\tau_{\max} < [\tau_{\text{дон}}] < (3,5 \cdot 10^7 \dots 5 \cdot 10^7)$ Па.

Для крутного моменту $T_k = 700$ Н м (рис. 6, рис. 7) максимальні дотичні напруження $\tau_{\max}$ за зміни діаметра гвинта ГГК в межах $0,1 \leq D \leq 0,2$ м змінюються в діапазоні від $3,3 \cdot 10^6$ до $1,8 \cdot 10^7$ Па, що не перевищує допустимих дотичних напружень $[\tau_{\text{дон}}]$ за зміни товщини витка в межах $B = 1,0 \dots 1,5$ мм. Тобто за значення $T_k = 700$ Н м, $D \leq 0,1$ та товщини витка $B \leq 1,0$ мм діаметр гвинта має бути $D \geq 0,1$ м. За товщини витка $B = 0,5$ мм та крутного моменту $T_k = 700$ Н м максимальні дотичні напруження $\tau_{\max}$ за зміни діаметра гвинта ГГК $D \geq 0,18$ м перевищують допустимі дотичні напруження $[\tau_{\text{дон}}]$, тобто в цьому випадку діаметр гвинта повинен бути менше за $0,18$ м, або $D < 0,18$ м.

Проаналізувавши умови міцності конструкції секції ГГК, раціональні конструктивно-кінематичні параметри гвинта, за яких дотримується умова забезпечення допустимих напружень та заданої продуктивності ГГК будуть такими: діаметр гвинта в межах $0,15 \dots 0,2$ м; крок гвинта в межах $0,5 \dots 0,6$ м; частота обертання гвинта в межах $100 \dots 200$ об/хв.

Список літератури

1. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З. та ін. *Гнучкі гвинтові конвеєри: проєктування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
2. Гудь В. З. *Механіко-технологічні основи розробки багатofункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу*: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Тернопіль, 2021. 410 с.
3. Lyashuk O. L. et al. *Mathematical model of bending vibrations of a horizontal feeder-mixer along the flow of grain mixture*. INMATEH: Agricultural Engineering. 2018. 55(2). P. 35–45.
4. Hevko R. B. et al. *Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyor*. INMATEH: Agricultural Engineering. 2016. 48(1). P. 29–34.
5. Lyashuk O. et al. *The study on nonlinear model of dynamics of a system "extruder elastic auger working body"*. Acta Technologica Agriculturae. 2016. 4. P. 102–107.
6. Рогатинський Р. М. *Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільськогосподарського виробництва*: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01, 05.05.05. Київ, 1997. 502 с.
7. Hevko R. B. et al. *Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers*. INMATEH: Agricultural Engineering. 2016. 48(1). P. 35–43.
8. Hevko R. B. et al. *Determination of the parameters of transporting and mixing feed mixtures along the curvilinear paths of tubular conveyers*. INMATEH: Agricultural Engineering. 2018. 55(2). P. 97–104.
9. Лещук Р. Я. *Обґрунтування конструктивно-силових параметрів секційних робочих органів гвинтових перевантажувальних механізмів*: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Львів, 2004. 166 с.
10. Roberts A. W. *The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors*. Powder Technology. 1999. 104(1). P. 56–67.
11. Roberts A. W. *Bulk solids: Optimizing screw conveyors*. Chemical Engineering. 2015. 122(2). P. 62–67.
12. Lutsiv I. V. et al. *Investigation of dynamical impact loads in screw conveyor drives with safety clutches*. INMATEH: Agricultural Engineering. 2017. 51(1). P. 69–77.
13. Lyashuk O. et al. *Analysis of resonance oscillations of extruder elastic screw conveyor*. International Journal of Engineering Research in Africa. 2019. 43. P. 49–58.
14. Rohatynskyi R. M. et al. *The research of the torsional vibrations of the screw in terms of impulsive force impacts*. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2015. 149(5). P. 64–68.
15. Hevko B. M. et al. *Improvement of machine safety devices*. Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering. 2018. 58(1). P. 17–25.
16. Hevko R. B. et al. *Development of a pneumatic screw conveyor design and substantiation of its parameters*. INMATEH: Agricultural Engineering. 2018. 54(1). P. 153–160.
17. Rachok V. *Influence of working elements of various configurations on the process of yeast dough kneading*. Ukrainian Food Journal. 2018. 7(1). P. 119–134.
18. Li H., Liu W. F. *The experimental research of screw conveyor feeding system*. New Trends in Mechanical Engineering and Materials. Applied Mechanics and Materials. 2013. 251. P. 101–103.
19. Roberts W. *Bulk solids: Optimizing screw conveyors*. Chemical Engineering. 2015. 122(2). P. 62–67.
20. Sun X. X., Meng W. J., Yuan Y. *Design method of a vertical screw conveyor based on Taylor–Couette–Poiseuille stable helical vortex*. Advances in Mechanical Engineering. 2017. 9(7). DOI: 10.1177/1687814017714984.

21. Tian Y. et al. *Research on the principle of a new flexible screw conveyor and its power consumption*. Applied Sciences. 2018. 8(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/app8071038>.
22. Lyashuk O., Sokil M., Vovk Y., Tson A., Gupka A., Marunych O. *Torsional oscillations of an auger multifunctional conveyor's screw working body with consideration of the dynamics of a processed medium continuous flow*. Ukrainian Food Journal. 2018. 7(3). P. 499–510.

References

1. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., et al. (2019). Flexible screw conveyors: Design, manufacturing technology, experimental research (207 p.). Ternopil: FOP Palanytsia V. A. [in Ukrainian].
2. Hud, V. Z. (2021). Mechanical-technological principles of developing multifunctional sectional screws for grain material (Doctoral dissertation, 410 p.). Ternopil. [in Ukrainian].
3. Lyashuk, O. L., et al. (2018). Mathematical model of bending vibrations of a horizontal feeder-mixer along the grain mixture flow. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 55(2), 35–45.
4. Hevko, R. B., et al. (2016). Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyor. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 48(1), 29–34.
5. Lyashuk, O., et al. (2016). Study of a nonlinear model of dynamics of the “extruder–elastic auger working body” system. *Acta Technologica Agriculturae*, 4, 102–107.
6. Rohatynskiy, R. M. (1997). *Mechanical-technological foundations of interaction between screw working bodies and agricultural raw material* (Doctoral dissertation, 502 p.). Kyiv. [in Ukrainian].
7. Hevko, Iv. B., et al. (2016). Investigation of bending radius for flexible screw sectional conveyors. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 48(1), 35–43.
8. Hevko, R. B., et al. (2018). Determination of transporting and mixing parameters of feed mixtures along curvilinear tubular conveyor paths. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 55(2), 97–104.
9. Leshchuk, R. Ya. (2004). *Substantiation of structural-force parameters of sectional screw working organs of overload mechanisms* (PhD dissertation, 166 p.). Lviv. [in Ukrainian].
10. Roberts, A. W. (1999). Influence of granular vortex motion on volumetric performance of enclosed screw conveyors. *Powder Technology*, 104(1), 56–67.
11. Roberts, A. W. (2015). Bulk solids: Optimizing screw conveyors. *Chemical Engineering*, 122(2), 62–67.
12. Lutsiv, I. V., et al. (2017). Investigation of dynamic impact loads in screw conveyor drives with safety clutches. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 51(1), 69–77.
13. Lyashuk, O., et al. (2019). Analysis of resonance oscillations of extruder elastic screw conveyors. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 43, 49–58.
14. Rohatynskiy, R. M., et al. (2015). Research of torsional screw vibrations under impulsive force load. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 149(5), 64–68.
15. Hevko, B. M., et al. (2018). Improvement of machine safety devices. *Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering*, 58(1), 17–25.
16. Hevko, R. B., et al. (2018). Development and substantiation of a pneumatic screw conveyor design. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 54(1), 153–160.
17. Rachok, V. (2018). Influence of working bodies of different configurations on yeast dough kneading. *Ukrainian Food Journal*, 7(1), 119–134.
18. Li, H., & Liu, W. F. (2013). Experimental research of screw conveyor feeding system. *New Trends in Mechanical Engineering and Materials. Applied Mechanics and Materials*, 251, 101–103.
19. Roberts, W. (2015). Bulk solids: Optimizing screw conveyors. *Chemical Engineering*, 122(2), 62–67.
20. Sun, X. X., Meng, W. J., & Yuan, Y. (2017). Design method of a vertical screw conveyor based on Taylor–Couette–Poiseuille helical vortex stability. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(7). doi.org/10.1177/1687814017714984.
21. Tian, Y., et al. (2018). Research on operating principles and energy consumption of a new flexible screw conveyor. *Applied Sciences*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/app8071038>.
22. Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Tson, A., Gupka, A., Marunych, O. (2018). Torsional oscillations of a multifunctional auger conveyor screw considering continuous granular medium flow. *Ukrainian Food Journal*, 7(3), 499–510.

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Viktor Gud**, Assoc. Prof., DSc., **Andrii Dyachun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergii Pankiv**
 Ternopil Ivan Pulu National Technical University, Ternopil, Ukraine

Substitution of Technological and Constructive-Kinematic Parameters of a Flexible Screw Conveyor

The article justifies the technological and calculated structural and kinematic parameters of a flexible screw conveyor (FSC) based on the condition of its structural strength. A new design of the FSC section with expanded technological capabilities is proposed, which ensures a reduction in the radius of curvature of the material transportation trajectory, as well as an increase in their efficiency compared to the known ones, a reduction in energy consumption and an increase in the lifting height of bulk materials transportation.

The main attention is paid to the choice of the design option of the screw working body (SW), which will depend on the nature of the transport and technological process, which regulates the types of loads on the main structural element of the SWC - the screw, or on the design features of the spiral and the SWC casing.

flexible screw conveyor, process, amplitude, productivity, power, power parameters, screw, bulk material, casing

Одержано (Received) 21.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 12.12.2025

Ю. А. Новицький*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
e-mail: novickii_yurka@ukr.net*

Дослідження надійності та періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів

В статті досліджені ключові аспекти надійності та обґрунтування періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів внутрішнього згоряння. Оптимальний інтервал заміни повітряного фільтра є критично важливим для забезпечення ефективної роботи двигуна та зниження зносу деталей, мінімізації витрат на паливо та ефективності використання мобільного енергетичного засобу. Метою представленої статті є аналіз факторів, що впливають на надійність повітряних фільтрів двигунів та обґрунтування оптимальної періодичності їх заміни на основі статистичного аналізу.

Розглянуто методики досліджень, які включають лабораторні та експлуатаційні випробування, збір статистичної інформації. Граничний стан повітряного фільтра двигуна оцінено за сукупність прямих і непрямих ознак. Представлено результати періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів автомобілів Mazda з їх статистичною обробкою. Розрахунками встановлені показники періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів: середня періодичність заміни становить 10,1 тис. км; середнє квадратичне відхилення середнього значення періодичності – 2,99 тис. км; коефіцієнт варіації – 0,44; зміщення початку розсіювання середньої періодичності заміни – 3,25 тис. км. Встановлені межі довірчих інтервалів середнього значення періодичності заміни повітряного фільтра двигуна для закону нормального розподілу: 6,03 тис. км – нижня довірна межа; 14,17 тис. км – верхня довірна межа.

Висновки підкреслюють важливість комплексного підходу до визначення періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів із врахуванням умов експлуатації, якості фільтрувальних елементів та заводу виробника. Для досягнення ефективності використання та економії коштів на технічне обслуговування та ремонткування, рекомендується враховувати фактичні умови експлуатації мобільних енергетичних засобів та технічний стан фільтрів.

повітряний фільтр двигуна, надійність, мобільний енергетичний засіб, періодичність заміни

Постановка проблеми. Повітряні фільтри є ключовими компонентами мобільних енергетичних засобів та удосконалюються разом з розвитком машинобудівної галузі. Аналіз показує, що застосування систем фільтрації повітря в мобільних енергетичних засобах продовжує зростати [1, 2]. Окрім фільтрів для вентиляції картерів агрегатів і фільтрів трансмісії, повітряних фільтрів салонів та фільтрів двигунів, в мобільних енергетичних засобах з'явився цілий ряд нових фільтрувальних систем.

Однією з найважливіших компонент системи впуску двигуна мобільного енергетичного засобу є повітряний фільтр [2, 3]. На відміну від салонних, повітряні фільтри двигуна зазвичай мають більшу площу фільтруючого елемента та більш щільну структуру матеріалу, оскільки вони повинні затримувати дрібніші частинки, підтримуючи високоточні характеристики та захищаючи деталі двигуна. Основна його функція полягає у запобіганні потраплянню абразивних частинок, включаючи пил, пісок та бруд з навколишнього середовища до циліндро-поршневої групи [4], оскільки це може призвести до прискореного зносу деталей, порушення зазорів у з'єднаннях, зниження компресії та погіршення ефективності роботи двигуна.

В статті [5] наведено результати досліджень та порівняння впливу різних ступенів засмічення повітряного фільтра на продуктивність двигуна та негативні викиди. Експерименти проводились на одноциліндровому чотиритактному дизельному

двигуні з водяним охолодженням шляхом блокування області фільтра на чотирьох режимах: 0%, 25%, 50% та 75%. Результати вказують на погіршення показників якості роботи двигуна та зростання викидів CO та CO₂, максимум яких становить 25%.

Порушення періодичності заміни або використання неякісного фільтра може призвести до значних негативних наслідків, таких як збільшення витрати пального, зниження потужності двигуна, підвищення викидів шкідливих речовин, а у крайніх випадках – до капітального ремонту двигуна [5]. Разом з тим, надмірно часта заміна фільтра є економічно невиправданою. Таким чином, визначення оптимальної періодичності заміни повітряних фільтрів та оцінка їх надійності є актуальним завданням не тільки для конструкторів, але й для виробників систем фільтрування, інженерів та власників техніки, експлуатаційників та працівників сервісної служби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження повітряних фільтрів та їх впливу на роботу двигуна є предметом багатьох наукових робіт. Літературний огляд показує, що на ефективність фільтрації та термін служби повітряного фільтра двигуна внутрішнього згорання впливає ціла низка взаємопов'язаних факторів. Міжнародний стандарт ISO 5011:2000 [6] є одним з основних документів, що регламентує методи випробувань повітряних фільтрів. Цей стандарт визначає характерні процедури для оцінки пилоємності, ефективності фільтрації та опору потоку повітря, які є визначальними параметрами для порівняння різних фільтруючих елементів.

Важливість типу фільтруючого матеріалу та його конструкція, площа робочої поверхні та розмір пор фільтра для пилоємності та ефективності фільтрації неодноразово підкреслювались у наукових публікаціях [7, 8]. Автори статей встановлюють вимоги до повітряних фільтрів двигунів та визначають їх основні характеристики, досліджують вплив різних розмірів пор фільтра та діаметру волокон для визначення продуктивності статичної та динамічної фільтрації. Для встановлення динамічної фільтраційної продуктивності фільтрів в науковій роботі використовується експериментальний пристрій. В процесі експериментів, для встановлення продуктивності статичної фільтрації, опору фільтрації та ефективності фільтрації чистого фільтра дослідження проводились з використанням методу затримки. Авторами статті встановлено, що у глибинному фільтруючому матеріалі ефективність та опір фільтрації тканинної структури покращувались за умови, коли розмір пор фільтра та діаметр волокон були меншими за величиною.

Автори наукової роботи [8] проводять порівняльний аналіз різних конструкцій повітряних фільтрів двигуна, встановлення їх здатності утримувати забруднення в умовах міського та сільського циклів використання техніки. Представлені в статті висновки вказують на те, що рекомендації виробників щодо періодичності заміни, як правило, є усередненими і можуть не відповідати реальним умовам експлуатації, особливо за умов високої запиленості.

Дослідження, які вказують на необхідність оптимального використання повітряного фільтра двигуна з метою зниження вартості частотої його заміни та забезпечення більшого терміну служби відображенні в науковій роботі [9]. В статті зазначено, що перепад тиску збільшується зі збільшенням об'ємної швидкості потоку повітря, а вища швидкість повітря у фільтрі призводить до проникнення аерозольних частинок до фільтрувального елементу. У зв'язку з проникненням більших частинок забруднень до фільтрувального елементу, ефективність фільтрації для рівномірного розподілу потоку покращується більше, ніж для нерівномірного розподілу потоку. В той же час для дрібних частинок забруднень ефективність фільтрації зменшується для рівномірного розподілу потоку.

Окремі дослідники особливу увагу приділили лише вимірюванню перепаду тиску на повітряному фільтрі двигуна, як найбільш об'єктивному показнику його забруднення [10].

Автори статті [11] зазначили, що зростання перепаду тиску прямо корелює зі збільшенням споживання палива та підвищенням рівня шкідливих викидів. Це підтвердило необхідність використання датчиків перепаду тиску як інструменту для моніторингу стану повітряного фільтра в режимі реального часу, та дозволило перейти від регламентного обслуговування до обслуговування за фактичним станом.

Випробування оригінальних повітряних фільтрів двигунів сімейства Renault K9K показали, як зазначено авторами статті [12], що їх заміна відповідає плану обслуговування, базується на кілометражі, але для більшості фільтрів проводилась передчасно. Автори відмітили, що в процесі використання автомобілів, повітряні фільтри просочуються шаром дрібного пилу, а їх ефективність фільтрації зростає.

Таким чином, аналіз літературних джерел підкреслює багатофакторність проблеми визначення оптимальної періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів, вказує на важливість врахування умов експлуатації та потенціалу використання сучасних методів моніторингу для підвищення їх надійності та економічності.

Постановка завдання. Метою представленої статті є аналіз факторів, що впливають на надійність повітряних фільтрів двигунів та обґрунтування оптимальної періодичності їх заміни на основі статистичного аналізу.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні завдання:

- дослідити надійність повітряних фільтрів двигунів за реалізації наступних етапів: збір емпіричних даних; експлуатаційні випробування; оцінка технічного стану; статистична обробка даних;

- обґрунтувати періодичність заміни повітряних фільтрів за встановлення ознак значного забруднення та погіршення режиму роботи двигуна.

Виклад основного матеріалу. Визначальними параметрами, які потребують вивчення, є обґрунтування критеріїв граничного стану та періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів внутрішнього згорання автомобілів Mazda. Повітряний фільтр є критично важливим елементом для захисту двигуна внутрішнього згорання від абразивних частинок, пилу, бруду та інших забруднень, що містяться в атмосферному повітрі. Ці забруднення, потрапляючи до циліндро-поршневої групи двигуна, можуть спричинити прискорений знос поршневих кілець, стінок циліндрів, клапанів та інших рухомих частин, та призвести до скорочення ресурсу агрегату.

Як зазначалось в багатьох наукових роботах, визначити самостійно, з використанням органолептичних методів точні терміни заміни повітряного фільтра не завжди можливо. Одним із прийнятних способів є дотримання рекомендацій заводу-виробника щодо встановлених експлуатаційних термінів. Однак необхідно враховувати, що в складних умовах експлуатації, високого ступеню запиленості, руху по ґрунтових дорогах, частих поїздках в заторах, термін служби фільтрувальних матеріалів скорочується, а фільтр може вийти з ладу раніше рекомендованого заводом-виробником терміну.

Граничний стан повітряного фільтра двигуна оцінено за рядом критеріїв, які формують сукупність прямих і непрямих ознак. До прямих ознак граничного стану фільтра відноситься візуальний аналіз, перевірка розмірів, визначення маси. До непрямих ознак граничного стану фільтра, що вказують на порушення функцій роботи двигуна, відносяться: зниження потужності двигуна; збільшення витрат пального; нестабільна робота двигуна; зміна кольору відпрацьованих газів.

Найбільш очевидними критеріями є візуальний огляд та оцінка параметрів технічної характеристики. Повне забруднення фільтруючого елемента, його сірий або чорний колір, наявність видимих часток пилу, бруду, листя чи комах на поверхні, а також деформація або пошкодження фільтрувального паперу (наприклад, розриви, відшарування від ущільнювачів) вказують на необхідність термінової заміни. Важливо перевіряти не лише зовнішній бік, а й внутрішній. Якщо на внутрішній стороні фільтрувального елемента є сліди пилу – це вказує на неефективну фільтрацію.

Забруднений фільтр обмежує потік повітря до систем двигуна, що призводить до збіднення паливно-повітряної суміші та зниження ефективності його роботи. Водій або ж оператор може помітити це як втрату динаміки, особливо при прискоренні або при русі вгору, під навантаженням. Забрудненість повітряного фільтра призводить до збільшення витрати пального. Двигун, не отримуючи достатньої кількості повітря, буде компенсувати це збільшенням подачі палива, що призводить до перевитрати. Нестабільна робота двигуна також може бути причиною понад допустимого забруднення повітряного фільтра. Ця ознака може проявлятися як нерівномірні оберти на холостому ходу, ускладнений запуск, перепади під час роботи. До непрямих ознак, які вказують на порушення роботи двигуна відноситься зміна кольору відпрацьованих газів. У разі сильного забруднення фільтра та неповного згоряння палива, відпрацьовані гази можуть стати більш темними або чорними.

Аналіз літературних джерел показує, що заміну повітряних фільтрів двигунів слід проводити, в середньому, кожні 10-20 тис. км пробігу або 1 раз на рік, залежно від того, що настане раніше. Однак, слід також пам'ятати, що у сильно запилених регіонах, при частих поїздках по бездоріжжю або в умовах інтенсивного міського трафіку, інтервал заміни повітряних фільтрів може бути скорочений до 5-7 тис. км. Для встановлення точної періодичності його заміни слід контролювати графік технічного обслуговування машин, який надається заводом-виробником.

Конструкція, технічна характеристика та особливості використання повітряних фільтрів двигуна повинні відповідати наступним вимогам: висока ефективність фільтрації; мінімальний опір потоку повітря; висока пилоємність; стійкість до вологості та перепадів температур; герметичність; механічна міцність; відповідність стандартам; конкурентні цінові вимоги; відповідність вимогам до обслуговування; упаковка для зберігання та транспортування; дизайн та зовнішній вигляд; можливість утилізації. Новий повітряний фільтр PE07-13-3A0A двигуна характеризується такими показниками технічної характеристики: довжина – 270 мм; ширина – 180 мм; висота – 40 мм. На рисунку 1 наведено результати контролю технічного стану нового та знятих з експлуатації повітряних фільтрів PE07-13-3A0A двигунів SKYACTIV-G 2.0. автомобіля Mazda: а – новий; б – через 5307 км використання; в – через 17139 км використання.

Режим випробування повітряних фільтрів двигунів був прийнятий як експлуатаційний. Пан випробувань на безвідмовність [NMT] включає наявність відповідної кількості об'єктів N , які за певних умов експлуатації передбачали відновлення працездатності M системи фільтрації, дослідження припинялись при досягненні відповідного напруження T та настання граничного стану об'єкту [13].

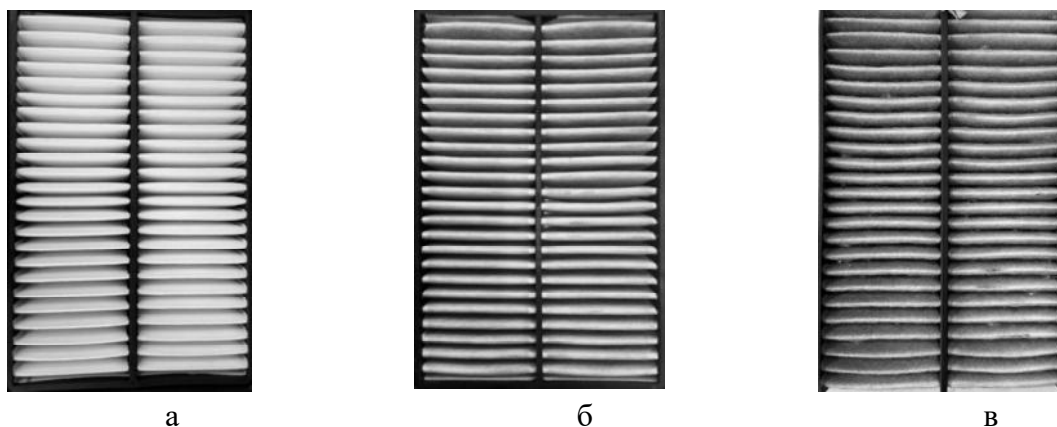


Рисунок 1 – Повітряні фільтри PE07-13-3A0A двигуна SKYACTIV-G 2.0 автомобіля Mazda:
а – фільтр новий; б – фільтр перевірений та замінений через 5307 км; в – фільтр перевірений та замінений після 17139 км

Джерело: розроблено автором

Статистичний ряд інформації сформовано за результатами випробування та перевірки технічного стану 25 повітряних фільтрів PE07-13-3A0A двигунів автомобілів Mazda. Проведено обробку інформації про періодичність заміни повітряних фільтрів PE07-13-3A0A. Результати розрахунків, які включають вибір кількості інтервалів, середини інтервалів, частоти подій, дослідні ймовірності подій, накопичену дослідну ймовірність подій наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Статистичний ряд інформації періодичності заміни повітряних фільтрів PE07-13-3A0A двигунів SKYACTIV-G 2.0 автомобілів Mazda

пп	Межі інтервалів	Середина інтервалу	Частота подій, m_i	Дослідна ймовірність подій, P_i	Накопичена дослідна ймовірність подій, ΣP_i
1	4513 – 7038,2	5715,4	5	0,2	0,2
2	7038,2 – 9563,4	8120,2	5	0,2	0,4
3	9563,4 – 12088,6	10525	9	0,36	0,76
4	12088,6 – 14613,8	12929,8	4	0,16	0,92
5	14613,8 – 17139,0	15334,6	2	0,08	1,0

Джерело: розроблено автором

Встановлено, що отриманий масив емпіричних даних характеризується наступними показниками: середня періодичність заміни становить 10,1 тис. км; середнє квадратичне відхилення середнього значення періодичності, $\sigma = 2,99$ тис. км; коефіцієнт варіації, $v = 0,44$; зміщення початку розсіювання середньої періодичності заміни, 3,25 тис. км. Проведена перевірка відповідності експериментальних даних з теоретичним законом розподілу проводилась за критерієм згоди А. М. Колмогорова. Розраховані межі довірчих інтервалів та інтервал розсіювання середнього значення періодичності заміни повітряного фільтра двигуна для закону нормального розподілу у відповідності з положеннями [13]: $t_{90}^H = 6,03$ тис. км – нижня довірна межа; $t_{90}^B = 14,17$ тис. км – верхня довірна межа; $I_{90} = 8,14$ тис. км – величина інтервалу.



Рисунок 2 – Гістограма розподілу, полігон розподілу, графік накопиченої дослідної ймовірності повітряного фільтра PE07-13-3A0A двигуна SKYACTIV-G 2.0 автомобіля Mazda

Джерело: розроблено автором

На основі аналізу гістограми, полігону розподілу, графіку накопиченої дослідної ймовірності та застосування критеріїв згоди, встановлено, що періодичність заміни повітряних фільтрів у даній вибірці найкраще описується нормальним законом розподілу. Отримані нами результати середньої періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів, які становлять 10,1 тис. км та їх нормального розподілу значною мірою корелюють з висновками, представленими в інших наукових працях, включаючи

[14, 15]. В статті [14] підкреслено, що оптимізація інтервалів оцінки технічного стану та необхідність заміни фільтра базується не лише на значеннях пробігу, але й на умовах його експлуатації та фактичному стані.

Досвід експлуатації системи фільтрації повітря двигунів та оцінка їх технічного стану, підтверджують необхідність уточнення періодичності їх заміни [15]. У відповідності до рекомендацій на обслуговування систем очищення повітря двигунів, автори статті зазначають, що періодичність їх заміни становить від 30 до 120 тис. км або ж один раз на рік. Щодо повітряних фільтрів PE07-13-3A0A автомобілів Mazda, в керівних матеріалах періодичність їх заміни 20 до 60 тис. км або ж один раз на рік.

Отримане в дослідженнях значення середньої періодичності заміни повітряного фільтра двигуна становить 10,1 тис. км. Часто автори наукових статей вказують на те, що коефіцієнт варіації для терміну служби повітряних фільтрів двигунів, які залежать від умов експлуатації може знаходитись в межах від 0,1 до 0,3. Отримане значення коефіцієнта варіації 0,44 може бути пояснено значними відмінностями умов експлуатації, що вказує на необхідність більшої точності при прогнозуванні періодичності заміни фільтрів та врахування умови експлуатації.

Перспективною в плані забезпечення надійності мобільних енергетичних засобів може бути методологія, яка запропонована в статтях [16, 17]. Автори статті [16] зазначають, що централізована система технічного обслуговування і ремонту мобільних машин за фактичним технічним станом дозволяє суттєво знизити недовикористаний ресурс деталей вузлів та агрегатів. Зазначена ідеологія також може бути актуальною для використання повного ресурсу повітряних фільтрів двигунів.

Задекларовані в статті [17] методичні підходи дають можливість за результатами експериментальних досліджень зі збору та обробки статистичної інформації про рівень експлуатаційної надійності вузлів і агрегатів оптимізувати номенклатуру елементів для забезпечення працездатності автомобілів. На основі результатів статистичних досліджень надійності повітряного фільтра може бути обґрунтована відповідна кількість резервних елементів, які потребують замовлення, як відмови які спричиняють незначне відхилення технічного стану автомобіля від нормативних показників.

Але дослідження напрямів забезпечення надійності мобільних енергетичних засобів повинні базуватись не лише на результатах статистичного аналізу, як це також зазначають автори статті [18], а повинні враховувати умови експлуатації та результати моніторингу технічного стану машин, прийняті стратегії ремонту та витрати на їх реалізацію.

Отримані результати відповідають сучасним науковим уявленням про особливості експлуатації та періодичність заміни повітряних фільтрів двигунів та підтверджують важливість переходу від регламентованих інтервалів заміни на користь підходів, які базуються на фактичному стані фільтра та умовах експлуатації.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що надійність та періодичність заміни повітряних фільтрів двигунів є динамічними показниками, які залежать від багатьох факторів, прямих та непрямих ознак.

Середній термін служби повітряного фільтра PE07-13-3A0A двигуна SKYACTIV-G 2.0 автомобіля Mazda для типових умов експлуатації становить 10,1 тис. км, але має значне розсіювання, як для нормального закону розподілу, що підтверджується середнім квадратичним відхиленням 2,99 тис. км та коефіцієнтом варіації 0,44. Встановлені межі довірчих інтервалів та інтервал розсіювання середнього значення періодичності заміни повітряного фільтра двигуна для закону нормального розподілу: 6,03 тис. км – нижня довірча межа; 14,17 тис. км – верхня довірча межа; 8,14 тис. км – величина інтервалу. Розподіл періодичності заміни повітряних фільтрів за нормальним законом розподілу дає можливість застосовувати стандартні статистичні методи для прогнозування та оптимізації інтервалів обслуговування.

Дотримання фіксованих інтервалів заміни повітряних фільтрів, які рекомендовані заводами-виробниками, не завжди є оптимальним. Для досягнення максимальної ефективності експлуатації та економії коштів, які використовуються на технічне обслуговування та ремонтування, рекомендується враховувати фактичні умови експлуатації мобільних енергетичних засобів та технічний стан фільтрів. Впровадження системи моніторингу технічного стану повітряних фільтрів дозволить оптимізувати періодичність, забезпечити своєчасну заміну забруднених фільтрів та уникнути передчасну їх заміну.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку системи технічного обслуговування, яка б використовувала дані про умови експлуатації та технічний стан повітряного фільтра двигуна для обґрунтування оптимального терміну заміни.

Список літератури

1. Новицький А., Карабінюш С., Ружи́ло З., Новицький Ю. Повітряні фільтри салонів транспортних засобів. *Agroexpert*. 2018. № 2(115). С. 82–84.
2. Новицький А., Ружи́ло З., Карабінюш С., Новицький Ю. Повітряні фільтри для двигунів внутрішнього згоряння та особливості їх обслуговування. *Agroexpert*. 2018. № 1(114). С. 64–67.
3. František Synák, Alica Kalašová, Ján Synák. Air Filter and Selected Vehicle Characteristics. *Sustainability*. 2020. № 12(22). DOI: 10.3390/su12229326.
4. Ravi Chander R., Sudheer Prem Kumar, Vijaya Kumar Reddy K., Chakradhar Goud S. Performance analysis of air filters for diesel engine: an experimental approach. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*. 2014. Vol. 4, Iss. 2. P. 14–32. URL: <http://www.euroasiapub.org>.
5. Vishal S. R., Prataprao K. O., Pravin N. A., Rammohan A. Investigation of effect of air filter clogging on performance and emissions from engine. *International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*. 2017. Vellore, India. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICMDCS.2017.8211699.
6. *ISO 5011:2000*. Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors – Performance testing. Edition 2. 2000. 39 p.
7. Liu X., Shen H., Nie X. Study on the filtration performance of the baghouse filters for ultra-low emission as a function of filter pore size and fiber diameter. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. № 16(2). P. 247. DOI: 10.3390/ijerph16020247.
8. Taibullah Modaqeq, Reza Joia, Marat Tulepov's, Orynkul Alisher Nurgaliuly. An In-Depth Analysis of Car Air Filters: Structure, Function and Operational Mechanisms. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*. 2025. № 3(1). P. 249–260. DOI: 10.59324/ejtas.2025.3(1).24.
9. Rajendra Kumar Bhatt, Madan Mohan Joshi, Anand Baghel. Review on Automotive Air Filter Performances. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2021. Vol. 11, Iss. 9(Series-II). P. 6–13. DOI: 10.9790/9622-1109020613.
10. Tadeusz Dziubak, Mirosław Karczewski. Experimental Study of the Effect of Air Filter Pressure Drop on Internal Combustion Engine Performance. *Energies*. 2022. № 15(9). P. 3285. DOI: 10.3390/en15093285.
11. Akal D., Selvi I. Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and emissions of diesel engines in tractors. *Petroleum Science and Technology*. 2023. № 41(24). P. 2419–2433. DOI: 10.1080/10916466.2023.2230248.
12. Marius Toma. A study of the air filters' maintenance for automotive internal combustion engines. *U.P.B. Sci. Bull., Series*. 2014. Vol. 76, Iss. 2. P. 101–110. URL: www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full8e1_421518.pdf.
13. ДСТУ 3004–95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Київ, 1995. 123 с.
14. Dziubak T., Bakała L. Problems of selecting filter partition in passenger car engine intake air filters. *Combustion Engines*. 2021. Vol. 185(2). P. 44–59. DOI: 10.19206/ce-139629.
15. Gailis M., Pirs V. Research on influence of the engine air filter replacement periodicity. *Engineering for Rural Development*. 2011. P. 173–178. URL: www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2011/Papers/032_Gailis.pdf.
16. Аулін В. В. та ін. Оптиміальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39)_II. С. 175–189. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.175-189.
17. Тищенко С. Ю., Аулін В. В., Гриньків А. В. Виявлення типових відмов елементів автомобілів групи Renault та обґрунтування вибору запасних частин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. II. С. 371–381. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.371-381.
18. Novytskyi A. V., Bannyi O. O. Statistical analysis of functioning of repair service of Ukraine. *Machinery and Energetics*. 2021. № 12(2). P. 39–47. DOI: 10.31548/machenergy2021.02.039.

References

1. Novytskyi, A., Karabyniosh, S., Ruzhylo, Z., & Novytskyi, Yu. (2018). Air cabin filters for vehicles. *Agroexpert*, 2(115), 82–84. [in Ukrainian].
2. Novytskyi, A., Ruzhylo, Z., Karabyniosh, S., & Novytskyi, Yu. (2018). Air filters for internal combustion engines and features of their maintenance. *Agroexpert*, 1(114), 64–67. [in Ukrainian].

3. Synák, F., Kalašová, A., & Synák, J. (2020). Air filter and selected vehicle characteristics. *Sustainability*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/su12229326>.
4. Ravi Chander, R., Sudheer Prem Kumar, V., Vijaya Kumar Reddy, K., & Chakradhar Goud, S. (2014). Performance analysis of air filters for diesel engine: An experimental approach. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*, 4(2), 14–32. <http://www.euroasiapub.org>.
5. Vishal, S. R., Prataprao, K. O., Pravin, N. A., & Rammohan, A. (2017). Investigation of air filter clogging effect on performance and emissions of engines. *International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*, Vellore, India, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMDCS.2017.8211699>.
6. ISO 5011:2000. Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors – Performance testing. (2000). Edition 2. 39 p.
7. Liu, X., Shen, H., & Nie, X. (2019). Study on filtration performance of baghouse filters for ultra-low emission depending on pore size and fibre diameter. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 247. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020247>.
8. Modaqeq, T., Joia, R., Tulepov, M., & Nurgaliuly, O. A. (2025). An in-depth analysis of car air filters: Structure, function and operational mechanisms. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 3(1), 249–260. [https://doi.org/10.59324/ejtas.2025.3\(1\).24](https://doi.org/10.59324/ejtas.2025.3(1).24).
9. Bhatt, R. K., Joshi, M. M., & Baghel, A. (2021). Review on automotive air filter performance. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 11(9, Series-II), 6–13. doi.org/10.9790/9622-1109020613.
10. Dziubak, T., & Karczewski, M. (2022). Experimental study of air filter pressure drop influence on engine performance. *Energies*, 15(9), 3285. <https://doi.org/10.3390/en15093285>.
11. Akal, D., & Selvi, I. (2023). Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and diesel engine emissions in tractors. *Petroleum Science and Technology*, 41(24), 2419–2433. <https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2230248>.
12. Toma, M. (2014). A study of air filter maintenance for automotive internal combustion engines. *U.P.B. Sci. Bull., Series*, 76(2), 101–110. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full8e1_421518.pdf.
13. DSTU 3004–95. Nadiinist tekhniky. Metody otsinky pokaznykiv nadiinosti za eksperymentalnyimi danymi. (1995). Kyiv, 123 p. [in Ukrainian].
14. Dziubak, T., & Bakała, L. (2021). Problems of selecting filter partitions for passenger car intake filters. *Combustion Engines*, 185(2), 44–59. <https://doi.org/10.19206/ce-139629>.
15. Gailis, M., & Pirs, V. (2011). Research on influence of engine air filter replacement periodicity. *Engineering for Rural Development*, 173–178. https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2011/Papers/032_Gailis.pdf.
16. Aulin, V. V., et al. (2023). Optimal maintenance and repair complex to increase reliability of machine units and systems. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39)_II, 175–189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.175-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.175-189) [in Ukrainian].
17. Tyshchenko, S. Yu., Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2025). Detection of typical failures of Renault group vehicles and justification of spare parts selection. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part II, 371–381. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.371-381](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.371-381). [in Ukrainian].
18. Novytskyi, A. V., & Bannyi, O. O. (2021). Statistical analysis of repair service functioning in Ukraine. *Machinery and Energetics*, 12(2), 39–47. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.02.039>.

Yuri Novitskyi

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Research on the Reliability and Frequency of Replacement of Engine Airfilters

The article examines key aspects of reliability and justification of replacement of air filters in internal combustion engines. The optimal air filter replacement interval is critical for ensuring efficient engine operation and reducing wear on parts, minimizing fuel costs, and optimizing the efficiency of mobile energy resources. The purpose of this article is to analyze the factors that affect the reliability of engine air filters and to justify the optimal replacement interval based on statistical analysis.

Research methods are considered, including laboratory and operational tests and the collection of statistical information. The limit state of the engine air filter is assessed based on a set of direct and indirect signs. The results of the replacement frequency of air filters in Mazda cars are presented with their statistical processing. Calculations have established the following indicators for the replacement frequency of engine air filters: the average replacement frequency is 10.1 thousand km; the standard deviation of the average replacement frequency is 2.99 thousand km; the coefficient of variation is 0.44; the shift in the beginning of the dispersion of the average replacement frequency is 3.25 thousand km. The confidence interval limits for the average frequency of engine air filter replacement for the normal distribution law have been established: 6.03 thousand km – lower confidence limit; 14.17 thousand km – upper confidence limit.

The conclusions emphasize the importance of a comprehensive approach to determining the frequency of replacement of engine air filters, taking into account operating conditions, the quality of filter elements, and the manufacturer's plant. To achieve efficiency in use and savings in maintenance and repair costs, it is recommended to take into account the actual operating conditions of mobile power equipment and the technical condition of the filters.

engine airfilter, reliability, mobile power unit, replacement frequency

Одержано (Received) 21.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 621.981

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.196-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.196-203)

Р. М. Рогатинський, проф., д-р техн. наук, **М. І. Пилипець**, проф., д-р техн. наук,
І. Г. Ткаченко, доц., канд. техн. наук, **М. Д. П'єнтак**, **Т. М. Пелешок**, канд. техн. наук,
П. О. Леськів

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: rogatynskyi@gmail.com*

Особливості формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням на циліндричній оправці

Дослідження присвячено моделюванню та технологічному проектуванню способів навивання гвинтових та трубчатих профілів обертовою циліндричною оправкою. У статті розглянуто напружено-деформований стан при навиванні профілів із різним співвідношенням висоти стрічок (смуг) до їх ширини в умовах чистого згину та згину поперечною силою. Встановлено відмінності при згині на циліндричній оправці широких смуг та вузьких стрічок на ребро, а також проміжних профілів. Виведена узагальнена залежність для розрахунку моментів навивання для різних випадків. Показано, що при згині поперечною силою з малим плечем її прикладання, внаслідок значних сил тертя на оправці, які протидіють стисненню внутрішніх шарів заготовки, виникають сили розтягу, тобто реалізується згин моментом із дією поздовжніх сил. При цьому, сумарний момент навивання буде дещо вищий, ніж при чистому згині. При цьому зростає радіальне навантаження на оправку, що негативно впливає на довговічність технологічного обладнання. Проте, згин вузьких стрічок на ребро поперечною силою із малим плечем прикладання дозволяє суттєво підвищити стійкість процесу їх навивання та розширити використання досліджуваного технологічного процесу для виготовлення витих профілів та розширити їх діапазон, зокрема, витих гвинтових спіралей.

технологічне проектування, згин поперечною силою, навивання на оправку, напружено-деформований стан, гвинтова спіраль

Постановка проблеми. Формування гвинтових та трубчатих профілів на оправку широко використовується у виробництві. Згідно прийнятої класифікації згин може проводитись як згинальним моментом, так і поперечною силою чи їх поєднанням. Зокрема, при виготовленні спіралей шнеків із вузьких стрічкових заготовок на оправку для забезпечення стійкості згину стрічки на ребро, навивання проводиться поперечною силою із малим плечем прикладання. Такий технологічний процес є складний, оскільки при цьому на оправці виникають суттєва реакція протидії згинальній силі та відповідні сили тертя, які створюють розтягуючи силу, що потребує детального розгляду напружено-деформованого стану. Певні складності виникають при встановленні силових параметрів процесу згину профілів із співрозмірними шириною та висотою профілю в зв'язку із реалізацією при цьому складного об'ємного напружено-деформованого стану. А тому, важливим для забезпечення стійкості процесу формування та збереження заданої форми профілів є встановлення узагальнених закономірностей зміни його енергосилових параметрів, приведених до одиничної ширини перерізу заготовки для різних перерізів смуг (стрічок) та умов навивання, а також побудова відповідної методики інженерного розрахунку технологічного процесу формування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню дослідження процесів згину профілів, в тому числі на циліндричній оправці, присвячена достатньо велика кількість джерел. Зокрема розробка теорії та прогресивних технологій навивання спіралей шнеків на ребро із великим співвідношенням висоти профілю до ширини із стрічок сприяла теоретичній розробці цих технологій [1-3, 11-15]. В [1,2] розглянуто напружено

деформований стан, який виникає при навиванні заготовок на ребро із значним співвідношенням висоти профілю до ширини, виведені залежності для встановлення енергосилових параметрів. В [3] розроблена теорія навивання профільних гвинтових елементів. Теорія формоутворення деталей із листових заготовок вкладена в [4]. Особливості гнуття смугових заготовок поперечною силою в умовах плоского деформованого стану розглянуто [5,6]. Розробка моделі чистого згину смуги на основі енергетичного критерію пластичності проведена в [7], а результати дослідження напружено-деформованого стані згину при розтягуванні заготовки подано у [8]. В [9] отримано аналітичні залежності для оцінювання жорсткості різнопрофільних шнекових заготовок у процесі їх виготовлення способом холодного навивання смугових заготовок ребром на оправу. В праці [10] розроблена математична модель кінцевої стадії процесу згинання смуги змінної ширини й товщини матрицею й пуансоном.

У монографіях [11-13] наведено теоретичне узагальнення і нове рішення розроблення моделей та високопродуктивних ресурсощадних технологічних процесів виготовлення гвинтових деталей з покращеними експлуатаційними характеристиками. В роботі [14] встановлено закономірності виготовлення навиванням профільних труб. В праці [15] дано теоретичне та експериментальне обґрунтування навивання спіралей шнеків зовнішньою трубчатою оправою. В [16] розроблено й експериментально апробовано технологічні процеси формоутворення вигнутого профілю на гвинтових заготовках з використанням шнекових оправ.

Постановка завдання. Метою дослідження є забезпечення стійкості процесу навивання профілів на циліндричну оправку та його економічної ефективності шляхом встановлення узагальнених закономірностей формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням на оправку, зокрема поперечною силою з малим плечем прикладання, та вибору раціональних параметрів процесу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо особливості формування листових та смугових заготовок на циліндричній оправці з невеликим відносним радіусом, тобто з високим ступенем нерівномірності витягування матеріалу, для якого характерна пластична деформація матеріалу практично по всій висоті профілю, тобто пружними деформаціями можна нехтувати. Виберемо циліндричну систему координат $O\rho\varphi z$, в якій вісь Oz співпадає із віссю оправки, а вісь $O\rho$ спрямована до зони, в якій проходить деформація згину. При згині стрічок на ребро, ширина початкового профілю яких B_0 суттєво менша початкової висоти H_0 , тобто $B_0 \ll H_0$, реалізується плоский напружений стан, в якому нормальне напруження по осі Oz та тангенціальні напруження в площинах $O\rho z$ і $O\varphi z$ будуть відсутні або несуттєві: $\sigma_z = 0$; $\gamma_{\rho z} = \gamma_{\varphi z} = 0$. В цьому випадку напруження σ_z буде середнім головним напруженням і, відповідно, $\sigma_z = \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) = 0$ і профіль у перерізі буде змінювати свою форму. Із врахуванням утяжки, висота профілю витої деталі буде $h = \eta H_0$, де $0,95 \leq \eta \leq 0,99$, а ширина профілю буде функцією радіуса кривини відповідного шару $b_\rho = b(\rho)$, рис.1,а.

При згині смуг, ширина профілю B_0 яких суттєво більша, ніж його висота H_0 , $B_0 \gg H_0$, рис. 1,б, реалізується плоский деформований стан, при якому нормальна деформація ε_z по осі Oz та тангенціальні деформації $\gamma_{\rho z}$ та $\gamma_{\varphi z}$ в площинах $O\rho z$ та $O\varphi z$ будуть відсутні або несуттєві, $\varepsilon_z = \gamma_{\rho z} = \gamma_{\varphi z} = 0$. Відповідно, тангенціальні напруження $\tau_{\rho z}$ та $\tau_{\varphi z}$ будуть відсутні, $\tau_{\rho z} = \tau_{\varphi z} = 0$, а головні напруження $\sigma_{1,3}$ із осьовими $\sigma_{\rho,\varphi}$ та тангенціальним $\tau_{\rho\varphi}$ напруженнями будуть пов'язані залежностями:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_p + \sigma_\varphi}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_p + \sigma_\varphi)^2 + \tau_{p\varphi}^2}; \quad \sigma_2 = \sigma_z = \frac{\sigma_p + \sigma_\varphi}{2}. \quad (1)$$

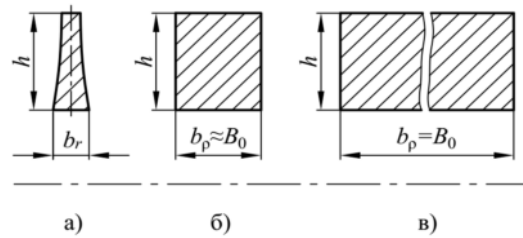


Рисунок 1 – Схеми витих профілів при навиванні на оправку із заготовок різного перерізу $B_0 \times H_0$:

а – із стрічки незначної товщини на ребро, $B_0 \ll H_0$; б – із заготовки прямокутного профілю із співрозмірними B_0 та H_0 ; в – із широкої смуги, $B_0 \gg H_0$

Джерело: розроблено авторами

При згині (навиванні) широких стрічок на оправку тобто для випадку реалізації плоского деформованого стану, при зміні радіального параметру ρ ширина смуги залишається постійною $b_p = B_0$.

Для навивання профілю із співрозмірними шириною B_0 та висотою H_0 , у повздовжніх перерізах заготовки будуть виникати тангенціальні напруження τ_{pz} та $\tau_{\varphi z}$, проте вони будуть незначні і не будуть мати суттєвого впливу на визначення енергосилових параметрів процесу згину. Нормальне напруження по осі Oz буде визначатись залежністю $\sigma_z \approx \sigma_2 = 0,5k_\sigma(\sigma_p + \sigma_\varphi)$, де k_σ - коефіцієнт впливу профілю на рівень осевих напружень, який залежить від питомої ширини профілю, $k_\sigma = k_\sigma(\zeta)$, де $\zeta = B/H$. При $\zeta \rightarrow 0$, $k_\sigma = 0$ при $\zeta \rightarrow \infty$, $k_\sigma = 1$. Виходячи із закономірностей пластичної деформації, функція $k_\sigma(\zeta)$ має бути неперервною та тричі диференційованою. Із функцій, якими можна апроксимувати функцію $k_\sigma = k_\sigma(\zeta)$, вибрано логістичну криву виду $k_\sigma(\zeta) = e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)} / (1 + e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)})$, де λ та ζ_m - параметри моделі, $\lambda \geq 1$, $\zeta_m \geq 4$.

Розглянемо умови навивання заготовок прямокутного перерізу різної питомої висоти профілю на циліндричну оправку поперечною згинальною силою P_y , з якою на заготовку діє притискний ролик і яка спрямована перпендикулярно напрямку подачі стрічки, рис. 2. Зі сторони притискного ролика, внаслідок можливого зминання заготовки та сил тертя, також діє горизонтальна сила P_x , спрямована протилежно напрямку подачі заготовки, $P_x = P_y \tan \gamma$, де γ - кут нахилу рівнодійної до нормального перерізу заготовки. Зі сторони оправки на заготовку діятиме нормальна реакція F , яка є рівнодійною контактних сил в зоні деформації стрічки на оправці, що поширюється від φ_1 до φ_2 , а також сили контактного тертя F_x , що появляються від скорочення внутрішньої крайки витка, $F_x = \mu F$, де μ - приведений коефіцієнт тертя. При обертанні оправки заготовка перерізом $B_0 \times H_0$ навиватиметься під дією згинального моменту M та поздовжньої сили розтягу витка N , рис. 2.

Рівняння рівноваги всіх сил, прикладених до заготовки, в зоні згину матиме вигляд, [1,2]:

$$\sum X = -P_x - F_x + N = 0; \quad (2)$$

$$\sum Y = -P_y + F = 0;$$

$$\sum M = P_y l_x + P_x R + F_x r - N r_c - M = 0.$$

де r_c - радіус центра перерізу профілю; l_x - плече прикладання сили P_y .

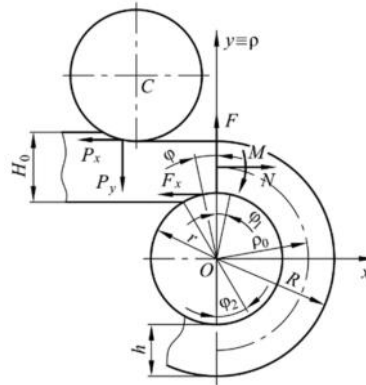


Рисунок 2 – Схема до розрахунку навивання стрічок поперечною силою з малим плечем її прикладання
Джерело: розроблено на підставі [2]

Із (2) випливає, що, із врахуванням $F = P_y$, сила розтягу витка N , згинальний момент M та сумарний момент $M_z = M + N r_c$ дії напружень σ_ϕ відносно осі Oz із силою згину P_y пов'язані залежністю.

$$N = (\mu + \operatorname{tg} \gamma) P_y;$$

$$M = (l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r) P_y - N r_c = [l_x + \operatorname{tg} \gamma (R - r_c) - \mu (r_c - r)] P_y;$$

$$M_z = (l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r) P_y.$$
(3)

Технологічно, ступінь кривини навитої стрічки оцінюють коефіцієнтом нерівномірності витягування ψ - відношенням радіуса зовнішньої крайки витка до радіуса його внутрішньої крайки, $\psi = R/r$, де r - внутрішній радіус витка спіралі. Радіус нейтральної поверхні напружень в умовах згину чистим моментом буде $\rho_n = \sqrt{Rr}$, [1,2,15]. Для випадку чистого згину радіус нейтральної поверхні деформацій ρ_{0n} знаходиться між радіусом центра ваги перерізу профілю r_c та радіусом нейтральної поверхні напружень та незначно від нього відрізняється, а тому приймемо $\rho_0 = \rho_n$. [1,2]. Для випадку навивання стрічки на ребро, рис.1а, ширина її профілю (товщина стрічки) b_p при згині змінюється залежно від коефіцієнта нерівномірності витягування ψ за законом, $b_p = B_0 \sqrt{\rho_0 / \rho}$. Відповідно ширина профілю по зовнішньому радіусу буде $b_R = B_0 \sqrt[4]{r/R} = B_0 / \sqrt[4]{\psi}$, а по внутрішньому - $b_r = B_0 \sqrt[4]{R/r} = B_0 \sqrt[4]{\psi}$. Тоді радіус центра ваги нормального перерізу витка буде $r_c = (R + r + \sqrt{Rr})/3$ [1,2], а уточнена залежність зміна його товщини b_p від ψ опишеться залежністю:

$$b_p = B_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = \frac{2\eta B_0 (1 + \psi + \sqrt{\psi})(\sqrt{R} + \sqrt{r})}{3(1 + \psi + 2\sqrt{\psi})\sqrt{\rho}}.$$
(4)

В загальному вигляді, рівняння рівноваги для плоского напруженого стану буде

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\phi}}{\rho \partial \phi} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\phi}{\rho} + \frac{\sigma_\rho \partial b_p}{b_p \partial \rho} = 0;$$
(5)

$$\frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_{\varphi}}{\rho \partial \varphi} + \frac{2\tau_{\rho\varphi}}{\rho} + \frac{\tau_{\rho\varphi}}{b_{\rho}} \frac{\partial b_{\rho}}{\partial \rho} = 0.$$

Для випадку навивання заготовок чистим моментом поперечною силою з великим плечем l_y , поперечні тангенціальні напруження $\tau_{\rho\varphi}$ є незначні і ними в осередку деформації нехтуємо. Крім цього, безпосередньо в осередку усталеної пластичної деформації $\partial \sigma_{\varphi} / \partial \varphi = 0$. Відповідно, умова рівноваги прийме вид

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\varphi}}{\rho} + \frac{\sigma_{\rho}}{b_{\rho}} \frac{\partial b_{\rho}}{\partial \rho} = 0 \quad (6)$$

Для широких смуг, тобто для випадку плоскої деформації, $b_{\rho} = B_0 = \text{const}$, звідки $\partial b_{\rho} / \partial \rho = 0$, і рівняння (6) суттєво спрощується.

Енергетичну умову пластичності для матеріалів, які піддаються зміцненню, приймемо у спрощеному вигляді. Для зони розтягу: $\sigma_{\varphi} - \sigma_{\rho} = \beta[\sigma_{T0} + \Pi \ln(\rho/\rho_0)]$, де σ_{T0} - екстрапольована границя текучості матеріалу стрічки; Π - лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки. Для зони стискування: $\sigma_{\varphi} - \sigma_{\rho} = -\beta[\sigma_{T0} - \Pi \ln(\rho/\rho_0)]$ - для плоского деформованого стану та $\sigma_{\varphi} - \sigma_2 = \sigma_{\varphi} = -\beta[\sigma_{T0} - \Pi \ln(\rho/\rho_0)]$ - для плоского напруженого стану.

Відповідно, із врахуванням (6), сила розтягу N визначиться інтегруванням напружень σ_{φ} , а момент згину відносно осі Oz - інтегруванням добутку $\rho \sigma_{\varphi}$ по висоті профілю. Для випадку чистого згину широких смуг, рис. 1.а, тобто для плоского деформованого стану, силою розтягу N нехтуємо і момент навивання M_0 визначається, як

$$M_0 = \frac{\beta B_0 H_0^2}{4} \left(\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\frac{R}{r}} \right) = \frac{\beta B_0 H_0^2}{4} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}). \quad (7)$$

Для випадку чистого згину тонких стрічок на ребро рис. 1.б, тобто для плоского напруженого стану, момент навивання при чистому згині M_0 буде

$$M_0 = \frac{\beta B_0 (R^2 + 2r\sqrt{Rr} - 3Rr)}{3} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}) = \frac{\beta k_M B_0 H_0^2}{4} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}), \quad (8)$$

де k_M - коефіцієнт приведення, що враховує плоский напружений стан. Із врахуванням розгляду плоского напруженого стану аналогічно [1], можна вивести наближене значення k_M ,

$$k_M = \frac{4(\sqrt{\psi} + 2)\sqrt[4]{\psi}}{3(\sqrt{\psi} + 1)^2} \approx \psi^{-0,1} \quad (9)$$

Для профілів із співрозмірними B_0 та H_0 , рис.1,б, коефіцієнт приведення $\psi^{-0,1} < k_M < 1$ і залежить від співвідношення $\zeta = B_0 / H_0$, $k_M = k_M(\zeta)$. Аналітичне визначення функції $k_M(s)$ є ускладненим і її доцільно апроксимувати функцією, яка повинна бути неперервною і тричі диференційованою. Цим вимогам відповідає логістична функція виду

$$k_M(\zeta) = \frac{\psi^{-1} + e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)}}{1 + e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)}}. \quad (10)$$

Залежність коефіцієнта приведення $k_M(\zeta)$ від питомої ширини профілю ζ з параметрами моделі $\lambda = 1$ та $\zeta_m = 4$ для різних значень коефіцієнтів витягування ψ

наведена на рис.3. На рис 4 наведена зміна моментів згину M від параметру перерізу профілю $\zeta = B/H$.

Побудова аналітичної залежності дозволяє використовувати виведені залежності для встановлення енергосилових параметрів не тільки для випадків плоского деформованого чи плоского напруженого стану. Але і проміжних випадків, коли ширина та висота гнутих профілів співрозмірні.

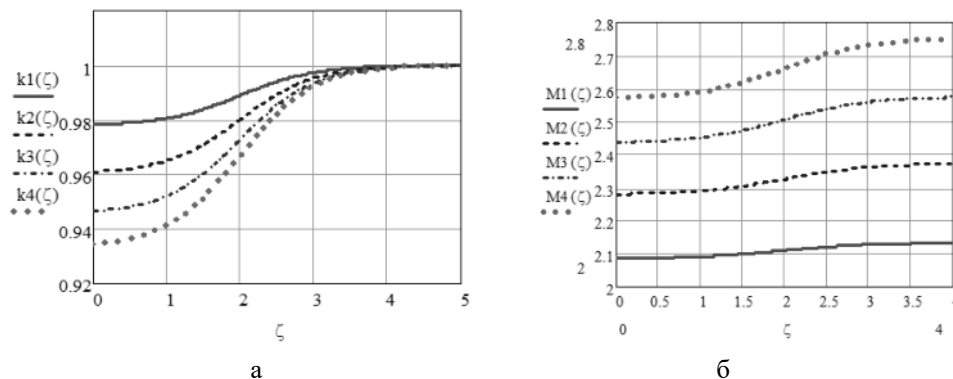


Рисунок 3 - Графіки зміни функції згладжування $k_M(\zeta)$ та моментів згину M від параметру перерізу

профілю $\zeta=B/H$ для різних коефіцієнтів витягування $\psi = \sqrt{R/r}$: 1 - $\psi=1,25$ ($k_1; M_1$);
2 - $\psi=1,5$ ($k_2; M_2$); 3 - $\psi=1,75$ ($k_3; M_3$); 4 - $\psi=2$ ($k_4; M_4$)

Джерело: розроблено авторами

Прийmemo, що сумарний момент M_z дії напружень σ_φ відносно осі Oz буде

$$M_z = M + Nr_c = k_N M_0, \quad (11)$$

де k_N - коефіцієнт перевищення осьового моменту M_z при згині поперечною силою k_N моменту чистого згину M_0 , $k_N = 1,05 - 1,25$.

Відповідно, силу N розтягу, із врахуванням (8) можна виразити через момент чистого згину M_0 .

$$N = \frac{k_N(\mu + \operatorname{tg} \gamma) M_0}{(l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} = \frac{\beta k_N k_M(\zeta)(\mu + \operatorname{tg} \gamma) B_0 H_0^2}{4(l_y + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} \quad (12)$$

Згідно (3), при відомому плечі прикладання поперечна сила згину буде

$$P_y = \frac{\beta k_N k_M(\zeta) B_0 H_0^2}{4(l_y + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} \quad (13)$$

За відомим сумарним моментом M_z відносно осі Oz визначаємо момент згину стрічки при одночасній дії сили розтягу і моменту згину можемо визначити

$$M = M_z - Nr_c = (l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r) P - Nr_c = N[(l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)/(\operatorname{tg} \gamma + \mu) - r_c] \quad (14)$$

В зоні, поза осередком згинання ($\varphi = \varphi_l$, рис.2), внаслідок розтягування стрічки поздовжньою силою N , вона бути обтискувати циліндричну оправку із виникненням на її поверхні радіальних контактних напружень

$$\sigma_r = \frac{N}{B_0 \sqrt[4]{\psi}}. \quad (15)$$

Уточнене значення нейтрального радіуса із врахуванням (15) буде

$$\rho_{HN} = \sqrt{Rr} \left(1 - \frac{\sigma_r}{2\beta\sigma_s} \right). \quad (16)$$

Уточнений розрахунок моделі, із врахуванням (16), показує, що сумарний момент M_z дії напружень буде дещо більшим порівняно із значенням, отриманим за

залежністю (11). Оскільки таке перевищення компенсується складовою Nr_c від сил тертя на оправці, яка є внутрішньою силою розподілу напружень, то сумарний момент M_n навивання прикладений до оправки, тобто до приводу технологічного обладнання, при цьому практично не зміниться і визначається за залежністю

$$M_n = P_y(l_x + R \operatorname{tg} \gamma) = \frac{\beta k_N k_M(\zeta) B_0 H_0^2 (l_x + R \operatorname{tg} \gamma)}{4(l_y + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} \quad (17)$$

де значення кута γ рівнодійної сили згину визначається експериментально чи через приведений коефіцієнт тертя (опору).

Висновки. На основі виявлених закономірностей навивання профілів різного січення показано, що зміну моменту навивання обертовою оправкою можна описати узагальненою залежністю для всіх профілів. Відповідно, розрахунок всіх енергосилових параметрів процесу навивання можна проводити по одній методиці, розробленій на основі даного дослідження, із врахуванням конкретних особливостей процесу навивання та характеристик заготовки.

Встановлено, що згин профілів поперечною силою із малим плечем прикладання відбувається при сумарному моменті навивання вищому, ніж при чистому згині, та, відповідно, при вищих енерговитратах. При цьому, суттєве зростання радіального навантаження на оправку негативно впливає на довговічність технологічного обладнання. Проте, при використанні відповідного технологічного обладнання, згин вузьких стрічок на ребро поперечною силою із малим плечем прикладання дозволяє суттєво підвищити стійкість процесу їх навивання. Це дозволяє значно розширити використання технологічного процесу виготовлення витих профілів навиванням на оправку та розширити їх діапазон, зокрема гвинтових спіралей для шнеків, що застосовується у гвинтових конвеєрах, змішувачах, іншому технологічному обладнанні.

Список літератури

1. Гевко Б. М. *Технология изгоовления спиралей инеков : монография*. Львов: Вища школа, 1986. 128 с.
2. Гевко Б. М., Рогатынский Р. М. *Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин*. Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1989. 176 с.
3. Hevko I., Dyachun A., Lyashuk O., Martsenko G. A. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 49(1). P. 77–82.
4. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 75 p.
5. Рогатынский Р. М., Данильченко Л. Н. Исследование поперечного изгиба полос в штампах. *Технология и организация производства*. 1990. № 4. 16 с. Деп. в УНИИНТИ 02.12.90 г., № 1160-Ук.
6. Данильченко Л. М., Гевко І. Б., Драган А. П. Дослідження напружено-деформованого стану в процесі формоутворення гнучких гвинтових заготовок. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛДТУ, 2002. С. 49–57.
7. Молтасов А. В., Мотрунич С. И. Исследование чистого изгиба полосы при больших деформациях на основании энергетического критерия пластичности. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2014. 1(70). С. 152–158.
8. Ma J., Welo T. Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 160. 103653. DOI: doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103653.
9. Vasykiv V., Pylypets M., Danylchenko 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. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033.
10. Краєвський В. О., Михалевич О. В. Математичне моделювання заключної стадії процесу згинання. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 1. С. 58–65.
11. Рогатынский 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.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Гупка А. Б., Третьяков О. Л. *Технологічне проектування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2025. 457 с.
13. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З. та ін. *Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 208 с.
14. Гевко І. Б., Рогатынский Р. М., Комар Р. В. та ін. Технологічне проектування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), Ч. 2. С. 109–116. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.109-116.
15. Study of power parameters of the screw spirals forming / O. Lyashuk, R. Rogatynskyy, I. Hevko та ін. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024 (4–7*

- June 2024, Pilsen, Czech Republic). Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. P. 287–298. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_24.
16. Hevko I., Hypka A., Krugluk O. Experimental research of power parameters of the process of forming a shelf on screw blank. *Scientific Journal of TNTU*. 2017. Vol. 87, № 3. P. 102–110. URI: elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/22911.

References

1. Hevko, B. M. (1986). Technology of manufacturing auger spirals: monograph. Lviv: Vyscha shkola [in Russian].
2. Hevko, B. M., & Rogatynskyi, R. M. (1989). Screw feeding mechanisms of agricultural machines. Lviv: Vyscha shkola, vyd-vo pry Lviv. un-te [in Russian].
3. Hevko, I., Dyachun, A., Lyashuk, O., & Martsenko, H. A. (2016). Research of the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 49(1), 77–82.
4. Marciniak, Z., Duncan, J. L., & Hu, S. J. (2002). Mechanics of sheet metal forming. Oxford: Butterworth-Heinemann.
5. Rogatynskyi, R. M., & Danylchenko, L. N. (1990). Study of transverse bending of strips in dies. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva*, (4), 16 pp. Deposited in UNINTI 02.12.1990, No. 1160-Uk [in Russian].
6. Danylchenko, L. M., Hevko, I. B., & Drahan, A. P. (2002). Study of the stress–strain state in the process of shaping flexible screw blanks. *Naukovi notatky*, 49–57 [in Ukrainian].
7. Moltasov, A. V., & Motrunych, S. I. (2014). Study of pure bending of a strip at large deformations based on the energy criterion of plasticity. *Visnyk NTUU “KPI”. Mashynobuduvannia*, 1(70), 152–158 [in Ukrainian].
8. Ma, J., & Welo, T. (2021). Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103653. doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103653.
9. Vasylykiv, V., Pylypets, M., Danylchenko, 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
10. Kraievskiy, V. O., & Mykhalevych, O. V. (2011). Mathematical modeling of the final stage of the bending process. *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, (1), 58–65 [in Ukrainian].
11. Rohatynskyi, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. Ye. (2014). Scientific and applied foundations of creation of screw transport-technological mechanisms: monograph. Ternopil: TNTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
12. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). Technological design and manufacturing of screw transport-technological working bodies. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., et al. (2019). Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Hevko, I. B., Rohatynskyi, R. M., Komar, R. V., et al. (2025). Technological design of methods for manufacturing U-shaped screw surfaces of transport pipes. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 109–116. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.109-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.109-116)
15. Lyashuk, O., Rogatynskyy, R., Hevko, I., et al. (2024). Study of power parameters of the screw spirals forming. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024*, 1, 287–298. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_24
16. Hevko, I., Hypka, A., & Krugluk, O. (2017). Experimental research of power parameters of the process of forming a shelf on screw blank. *Scientific Journal of TNTU*, 87(3), 102–110. URI: elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/22911

Roman Rohatynskyi, Prof., DSc., **Mykhailo Pylypets**, Prof., DSc., **Igor Tkachenko**, Assoc. Prof., PhD, **Mariia Pientak**, **Taras Peleshok**, PhD, **Palvo Leskiv**
Ternopil Ivan Pulu National Technical University, Ternopil, Ukraine

Features of Forming Screw and Tubular Profiles by Winding on a Cylindrical Mandrel

The article presents models of winding profiles from strips with different height-to-width ratios of the cross-section using a rotating cylindrical mandrel, along with a justification for the technological design of winding methods for screw and tubular profiles. The stress–strain state during winding is analyzed for plane strain and plane stress conditions under pure bending and bending by transverse force. Differences were established between the bending behavior of wide strips, narrow strips bent on edge, and intermediate profiles on a cylindrical mandrel. A generalized expression was derived to calculate the winding moments for profiles of different cross-sections.

It was demonstrated that when bending by a transverse force with a short lever arm, significant friction forces on the mandrel resist the compression of the inner layers of the workpiece, resulting in tensile stresses; thus, bending occurs due to a moment combined with longitudinal forces. Consequently, the total winding moment is higher than under pure bending, leading to greater energy consumption. At the same time, the radial load on the mandrel increases significantly, which negatively affects the durability of the technological equipment.

However, bending narrow strips on edge by a transverse force with a short lever arm improves the stability of the winding process and enables broader application of this technological method for the production of twisted profiles. This, in turn, expands the range of wound profiles, in particular screw spirals used in screw conveyors, mixers, and other technological equipment.

technological design, transverse force bending, mandrel winding, stress–strain state, screw spiral

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 01.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

УДК 629.3:621.89:004.89:658.5 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.204-219](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.204-219)

В. М. Чумак, Є. В. Манько, В. Г. Байцан, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук,
С. В. Лисенко, доц., канд. техн. наук, **А. В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: aulinvv@gmail.com

Універсальний метод формалізації параметрів ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки для систем предиктивного обслуговування

В роботі показано, що в епоху четвертої промислової революції та всеохоплюючої диджиталізації виробничих комплексів критично важливим стає завдання гарантування експлуатаційної стійкості та подовження терміну служби критичних компонентів автомобільного та агропромислового обладнання. Встановлено, що класичні методики оцінювання працездатності техніки, які базуються на регламентованих термінах сервісу, не задовольняють актуальні потреби рентабельності виробництва та експлуатаційної безпеки. Ідентифіковано ключову проблематику – брак уніфікованої системи структурування параметрів деталей: існуючі методи (FMEA, CAD/PLM-системи, спеціалізовані трибологічні бази даних) характеризуються високою специфічністю та не дозволяють масштабування прогностичних моделей на довільні типи компонентів без значних експериментальних витрат.

Запропоновано методи універсальної формалізації параметрів ресурсовизначальних деталей у вигляді універсального опису деталі (УОД), що поєднує матеріалознавчі, геометричні, експлуатаційні та надійнісні параметри в єдину структуровану форму. Показано, що УОД інтегрує явну специфікацію умов експлуатації, матеріальний стан та методи вимірювання зносу. Розроблено експертну систему, що автоматично класифікує домінуючий механізм зношування за параметрами УОД та вибирає відповідні калібровані фізичні моделі: моделі Арчарда для абразивного зношування, модель Пальмгрен-Майнера для втомного зношування та кастомізовану модель для зношування в ґрунті.

Проведено порівняльне дослідження УОД з альтернативними підходами (FMEA, CAD/PLM, трибологічні БД, IoT) на дванадцяти категоріях деталей транспортної (ТТ) та сільськогосподарської техніки (СГТ). Виявлено, що УОД значно скорочує час розробки прогностичних моделей, підвищує точність прогнозу залишкового ресурсу: MAPE УОД – 3,2%; FMEA – 16,8% для стабільних умов експлуатації. При цьому забезпечується універсальність застосування без модифікації структури та масштабованість адаптації до нових типів деталей.

Валідація на реальних експлуатаційних даних 50 одиниць техніки для кожного типу деталі протягом 1000...5000 годин підтвердила надійність методу: середня абсолютна відсоткова похибка MAPE становила 3,2...4,4% для транспортних деталей ТТ та 4,4...5,2% для деталей СГТ з варіаціями умов експлуатації при використанні каліброваних моделей у типових умовах. Результати підтверджують можливість інтеграції УОД у системи предиктивного обслуговування та CAD/PLM-платформи для забезпечення масштабованих рішень щодо визначення залишкового ресурсу експлуатації деталей ТТ і СГТ.

універсальний опис деталі (УОД), предиктивне обслуговування, формалізація параметрів, порівняльний аналіз методик, механізми зношування, прогнозування залишкового ресурсу, фізичні моделі зносу, експертна система, калібровані моделі

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку транспортної (ТТ) та сільськогосподарської техніки (СГТ) характеризується посиленими вимогами до їх надійності та ефективності експлуатації [1, 2]. Особливу актуальність набуває проблема прогнозування залишкового ресурсу ресурсовизначальних деталей, що безпосередньо впливає на безпеку експлуатації та економічні показники. Традиційні підходи до технічного обслуговування, засновані на календарних графіках, не враховують індивідуальні умови експлуатації та реальний технічний стан обладнання. Це призводить

до неправомірно частих та дорогих ремонтів або до раптових відмов [3, 27].

Основним недоліком існуючих систем предиктивного обслуговування, predictive maintenance (PdM) є їхня висока специфічність. Наприклад, при архітектурної рекурентної нейронної мережі з довгою короткочасною пам'яттю, long short-term memory (LSTM) для моніторингу підшипників [4] не можуть бути ефективно адаптовані для інших компонентів без значних витрат часу та ресурсів. Розробка прогностичної моделі для нового типу деталі традиційно вимагає тривалих експериментальних досліджень. Це обумовлено відсутністю універсальної методології формалізації параметрів різнотипних деталей ТТ і СГТ, що унеможливорює створення масштабованих систем прогнозування зносу та їх інтеграцію у єдину інформаційну платформу для великих парків машин.

Аналіз практичного впровадження PdM-систем показує, що компанії змушені розробляти окремі моделі для кожної категорії деталей, використовуючи різні методики опису параметрів та калібрування. Це призводить до розпорошення даних, неможливості трансферу знань між категоріями деталей та неефективності розробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень свідчить про активний розвиток двох основних напрямів у галузі предиктивного обслуговування ТТ і СГТ: фізико-математичного моделювання процесів зношування та застосування методів штучного інтелекту (ШІ) для аналізу експлуатаційних даних.

До фізико-математичних моделей зношування, можна віднести: модель Арчарда для абразивного зношування, моделі контактної втоми Пальмгрена-Майнера для зубчастих передач і підшипників та ін. Вони забезпечують глибоке розуміння фізичних процесів. Проте калібрування цих моделей вимагає тривалих експериментальних досліджень. В той час їх адаптивність до реальних умов експлуатації часто залишається обмеженою через неврахування динамічної варіабельності параметрів.

Методи машинного навчання (ММН), зокрема глибокі нейронні мережі (LSTM, CNN) [8], демонструють високу ефективність у прогнозуванні залишкового ресурсу завдяки здатності виявляти складні нелінійні закономірності в експлуатаційних даних. Систематичний огляд ММН для предиктивного обслуговування [9] показує, що такі методи вимагають значних обсягів якісних даних для навчання й не дозволяють ефективного трансферу між категоріями деталей без перенавчання [10,11,28,29].

Для формалізації параметрів деталей існують наступні системи:

- CAD/PLM-системи [12], які забезпечують детальний геометричний опис деталей та управління їхнім життєвим циклом. В той час традиційно вони не інтегрують експлуатаційні параметри та характеристики зношування.

- FMEA-методологія [13] описує якісні режими відмов, але не формалізує кількісні параметри для обчислювального прогнозування ресурсу.

- Трибологічні бази даних [14, 15], що містять дані про коефіцієнти тертя та зношування матеріалів, але без єдиної структури. При цьому інформація розпорошена в різних виданнях з різними системами позначень та обмежена специфічними типами контактів.

- IoT-системи моніторингу технічного стану деталей ТТ і СГТ фокусуються на збиранні динамічних даних (вібрація, температура). Але такі системи часто не інтегрують статичні параметри деталей (матеріал, геометрія, термообробка), що є критичними для фізичного моделювання. Можливо при цьому визначити критичну дослідницьку прогалину: на сьогодні не існує єдиної методології, що поєднує матеріалознавчі, геометричні, експлуатаційні та надійнісні параметри в одну структуровану форму, яка придатна для наступних процесів [26]:

- автоматизована обробка без експертного втручання;

- масштабування на довільні типи деталей без модифікації структури;
- калібрування фізичних моделей зношування за документаційними даними, без проведення нових експериментів.
- трансфер прогностичних моделей між категоріями деталей.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка та експериментальна валідація методу універсальної формалізації параметрів ресурсовизначальних деталей ТТ і СГТ через структуру універсального опису деталі (УОД), а також проведення порівняльного дослідження його ефективності з існуючими підходами для забезпечення масштабованих систем предиктивного обслуговування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити структуру УОД, що включає матеріалознавчі (марка, стан термообробки, твердість), геометричні (тип контакту, площа, шорсткість), експлуатаційні (навантаження, швидкість, температура, забруднення, параметри ґрунту) та надійнісні параметри, необхідні для автоматизованого прогнозування залишкового ресурсу;
- провести детальний порівняльний аналіз УОД з альтернативними методиками (FMEA, CAD/PLM-системи, спеціалізовані трибологічні БД, IoT-системи) за критеріями: часовитрата розробки прогностичної моделі, точність прогнозу залишкового ресурсу (метрика MAPE), повнота та структурованість опису параметрів, масштабованість адаптації до нових типів деталей, ступінь автоматизації операцій;
- розробити експертну систему на основі правил для автоматичної класифікації домінуючих механізмів зношування (абразивне, втомне, корозійне, адгезійне, комбіновані) на основі параметрів УОД з вказівкою вагових коефіцієнтів та довірчих інтервалів;
- розробити та калібрувати фізичні моделі зношування (модель Арчарда для абразивного, модель Пальмгрена-Майнера для втомного, кастомізовану модель для абразивно-ґрунтового) з явною специфікацією умов калібрування, джерел експериментальних даних та інтервалів невизначеності прогнозів;
- провести експериментальну валідацію запропонованого методу УОД на різних типах ресурсовизначальних деталей ТТ і СГТ з різними матеріалами, станами термообробки та механізмами зношування;
- кількісно обґрунтувати ефективність УОД через порівняння з реальними даними експлуатації парків техніки, використовуючи метрики точності (MAPE, R^2 , RMSE);
- визначити та документувати шляхи інтеграції УОД у сучасні системи предиктивного обслуговування, CAD/PLM-платформи та IoT-системи моніторингу.

Викладення основного матеріалу. Метод УОД визначається як формалізована структура даних, що містить сукупність параметрів, необхідних для ідентифікації деталі, розрахунку напруженого стану при експлуатації, прогнозування залишкового ресурсу та планування технічного обслуговування.

УОД будується на п'яти принципах: повнота; універсальність; структурованість; автоматизованість; розширюваність.

Повнота – це включення всіх критичних параметрів для механізмів зношування та прогнозування. Під універсальністю будемо розуміти застосовність до деталей будь-яких категорій без модифікації структури. Структурованість розглядають як ієрархічну організацію для автоматизованої обробки. Під автоматизованістю – можливість заповнення з технічної документації та відкритих джерел без експериментів. Розширюваність розглядається як можливість додавання нових параметрів та адаптації для регіональних умов.

Структура УОД (рис. 1) складається з шести блоків:

Блок 1: Ідентифікація – назва, артикул, деталь, вузол, система, агрегат, функціональне призначення.

Блок 2: Матеріали – марка матеріалу (за ДСТУ/ISO), стан термообробки (відливка, нормалізація, гартування, цементация) з описом температур, виміряна твердість HV/HB/HRC з довірчим інтервалом, модуль пружності E , межа міцності σ_b , джерело даних.

Блок 3: Геометрія – тип контакту (ковзний, кочення, герцівський), площа контакту A (мм²), шорсткість Ra (мкм), радіуси кривизни r_1 , r_2 , критичні геометричні параметри (товщина, діаметр).

Блок 4: Експлуатаційні умови – навантаження F (Н), швидкість v (м/с), температура T (К), тип та в'язкість змащування ν (сSt), рівень забруднення C (%), для СГТ техніки: тип ґрунту, піщаність (%), вологість (%), швидкість обробітку (км/год), глибина обробітку (см).

Блок 5: Надійність – середній розрахунковий ресурс $\bar{T}_p$ (год), критичні режими відмови, регламентні терміни ТО.

Блок 6: Метрологія – метод вимірювання зносу (товщина стінки, профілометрія, глибина пітінгу, втрата маси), точність вимірювань, критерій відмови (допустимий знос).

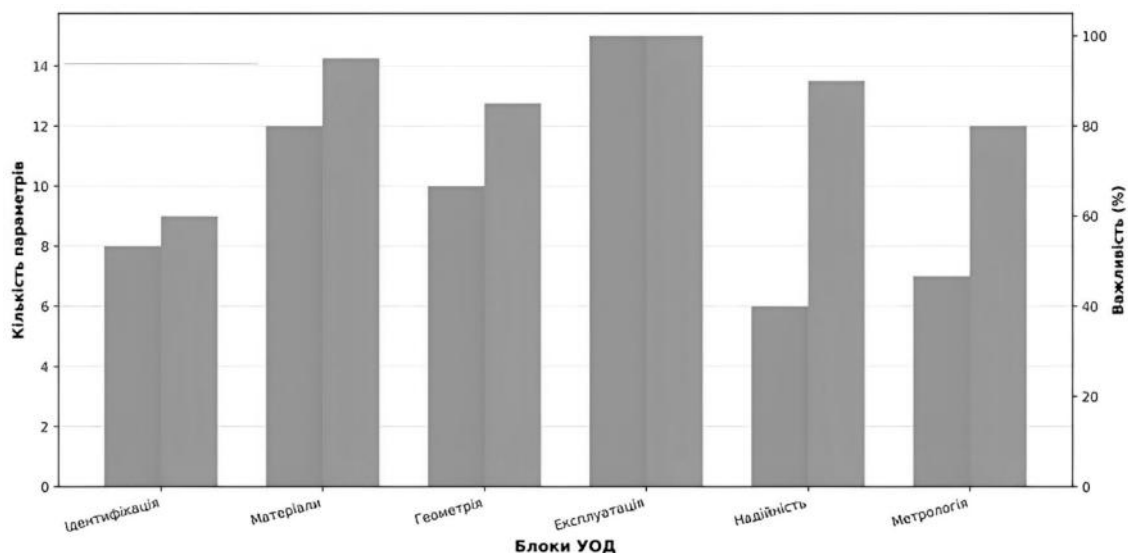


Рисунок 1 – Структура універсального опису деталі з визначеною кількістю параметрів у вигляді блоків та відносна їх важливість: ■ – кількість параметрів; ■ – важливість (%)

Джерело: розроблено авторами

На рис. 1 показана структура УОД, яка складається з шести блоків, кількість параметрів у кожному блоці та відносну важливість блоків для прогнозування залишкового ресурсу. Найважливішими є блоки "Експлуатація" (15 параметрів, важливість 100%) та "Матеріали" (12 параметрів, важливість 95%), які визначають домінуючі механізми зношування.

Загальна кількість параметрів у УОД становить 58, що забезпечує повноту опису для автоматизованого прогнозування. Кожен блок містить як обов'язкові параметри (мінімум 80% заповнення для функціонування моделей), так і опціональні (для підвищення точності прогнозів).

При цьому експертна система реалізована як набір логічних правил для автоматичної класифікації домінуючого механізму зношування на основі параметрів УОД (табл.1).

Система аналізує комбінації параметрів з блоків 2-4 (матеріали, геометрія, експлуатація) та визначає домінуючий механізм з точністю 92% порівняно з експертною оцінкою.

Таблиця 1 – Правила класифікації механізмів зношування

Механізм зношування	Умови активації правила класифікації	Вага, w	Довірчий інтервал
Абразивне	(H < 400 HV) AND (C _p > 0,8%) AND (v > 1 м/с)	0,6...0,9	±25%
Втомне	(циклічне навант.) AND (герцівський контакт) AND (σ/σ _{lim} > 0,5)	0,5...0,7	±30%
Корозійне	(T > 120°C) AND (v < 25 сSt) AND (H < 350 HV)	0,6	±35%
Адгезійне	(v < 15 сSt) AND (v < 3,0 м/с) AND (p > 300 МПа) AND (граничне змащ.)	0,7	±30%
Абразивно-грунтове	(с/г техніка) AND (C _p > 5%) AND (контакт з ґрунтом)	0,8	±40...50%

Джерело: розроблено авторами

Домінуючий механізм визначається за формулою:

$$M_{\text{домін}} = \arg \max_i W_i \cdot I_i, \quad (1)$$

де I_i – індикатор активації i -го правила (1 або 0), W_i – вага механізму.

Відповідна вага механізму зношування і довірчих інтервалів наведені на рис. 2.

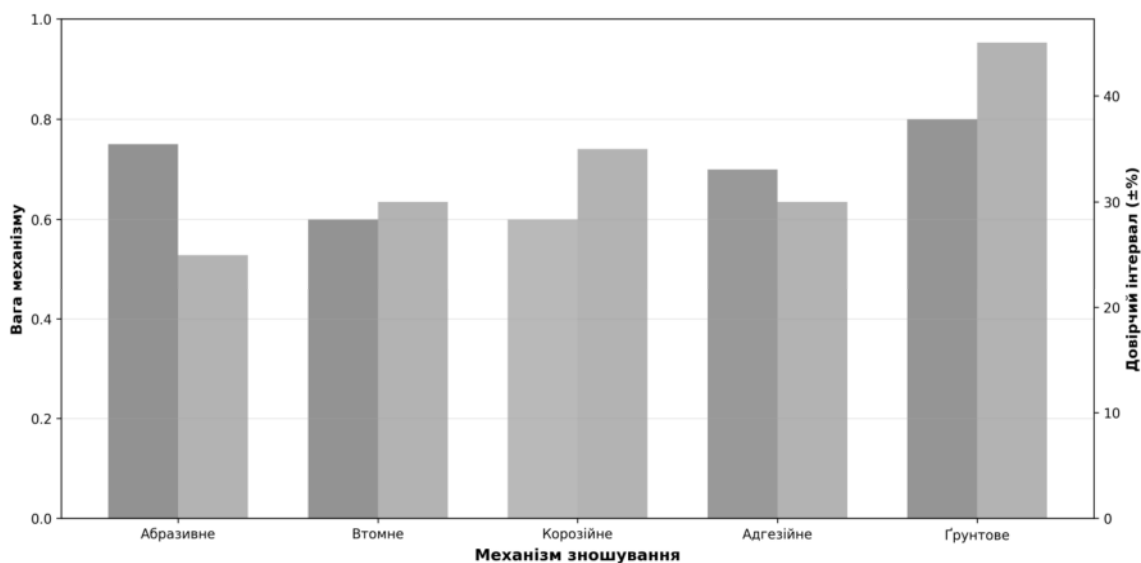


Рисунок 2 – Вагові коефіцієнти та довірчі інтервали для механізмів зношування, визначених експертною системою: ■■■■, ■■■■, ■■■■, ■■■■ – механізм зношування; ■■■■ – довірчий інтервал (±%)

Джерело: розроблено авторами

Експертна система автоматично вибирає відповідну калібровану модель на основі визначеного механізму. На рисунку 2 візуалізовані вагові коефіцієнти та довірчі інтервали для кожного механізму зношування. Можна бачити, що найвищу вагу (0,8) та найбільшу невизначеність (±40...50%) має абразивно-грунтове зношування через варіативність ґрунтових умов: піщаність, вологість, швидкість обробітку.

Система також визначає можливість одночасної дії декількох механізмів (комбіновані режими зношування) та обчислює їхній відносний внесок у загальний знос деталі. У випадках, коли активується більше одного правила з ваговими коефіцієнтами, що відрізняються менш ніж на 0,2, система класифікує режим як комбінований та застосовує суперпозицію моделей з відповідними ваговими

коефіцієнтами.

Для кожного механізму зношування розроблено та калібровано відповідну фізичну модель з явною специфікацією джерел експериментальних даних та інтервалів невизначеності.

Модель 1 для абразивного зношування базується на теорії Арчарда [6]:

$$W_{abr} = \frac{K_a \cdot F \cdot L}{H} \cdot f(C_p, T, \vartheta), \quad (2)$$

де W_{abr} – об'ємний знос, мм³; K_a – коефіцієнт абразивності; F – навантаження, Н; L – відносне переміщення, м; H – твердість матеріалу деталі, HV; $f(C_p, T, \vartheta)$ – поправочна функція.

Значення каліброваного коефіцієнта абразивності залежать від забрудненості середовища [6, 18] і режимів мащення:

– $K_a = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-8}$ – для чистого мінерального змащування (SAE 15W-40), $C_p < 0,3\%$, $T = 60 \dots 90^\circ\text{C}$;

– $K_a = (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$ – для помірного забруднення ($C_p = 0,5 \dots 2,5\%$), змішане змащування, абразивні частинки 5...50 мкм

– $K_a = (5,0 \pm 2,0) \cdot 10^{-7}$ – для сильного забруднення ($C_p > 3\%$), граничне змащування, абразивні частинки > 50 мкм.

Поправочна функція має наступний вигляд:

$$f(C_p, T, \vartheta) = 1 + 0,15 \cdot C_p + 0,008 \cdot (T - 60) + 0,02 \cdot \ln \frac{100}{v}, \quad (3)$$

де C_p – ступінь забрудненості, %; T – температура.

Калібровані коефіцієнти K_a для трьох режимів змащування з інтервалами невизначеності проілюстровані на рис. 3.

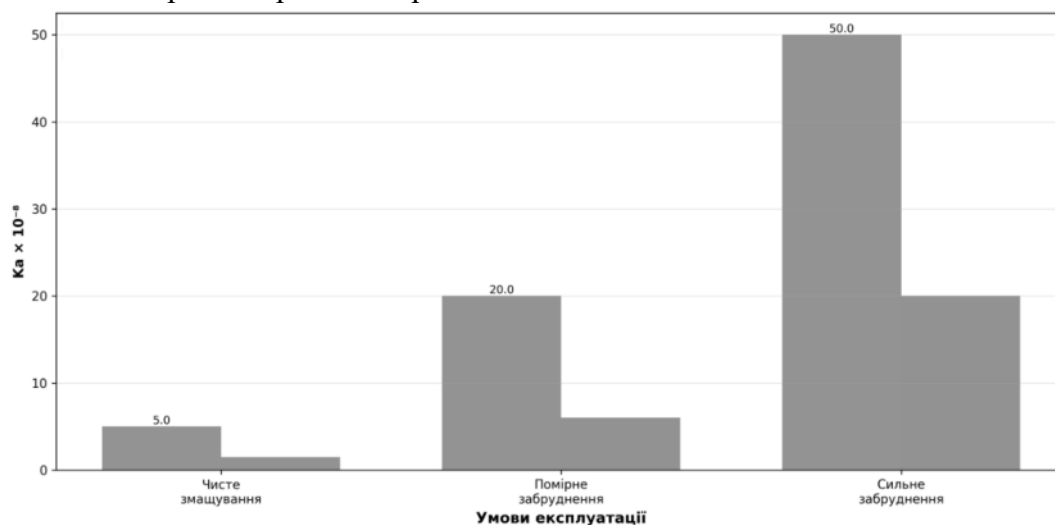


Рисунок 3 – Графічне відображення калібровані коефіцієнтів K_a згідно моделі Арчарда [6] для абразивного зношування і трьох режимів змащування/забруднення з інтервалами невизначеності:

■ – $K_a \times 10^{-8}$, ■ – невизначеність ($\pm$)

Джерело: розроблено авторами з використанням даних робіт [6] і [18]

Коефіцієнт K_a зростає від $5,0 \cdot 10^{-8}$ (чисте змащування) до $50,0 \cdot 10^{-8}$ (сильне забруднення), що відповідає 10-кратному збільшенню інтенсивності зношування деталей машин.

Інтервал невизначеності $\pm 30\%$ враховує варіації умов експлуатації в межах однієї категорії.

Модель 2 для втомного зношування (модель Пальмгрена-Майнера [7]) базується на лінійній гіпотезі накопичення пошкоджень:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{lim}} \right)^m \cdot \frac{n_i}{10^6}, \quad (4)$$

де $D(t)$ – ступінь пошкодження деталі; σ_i – напруження циклу; σ_{lim} – границя втоми; m – показник степеня (3,0...3,5); n_i – кількість циклів.

Для різних матеріалів деталей маємо наступні каліброваних параметрів [7, 16]:

– для загартованих сталей (ШХ15): $m = 3,5 \pm 0,3$, коефіцієнт зносу $k_w = 30 \pm 10$ мкм/од. пошкодження;

– для нормалізованих сталей (40X, сталь 45): $m = 3,2 \pm 0$, $k_w = 35 \pm 12$ мкм/од.;

– для чавуну (СЧ25-30): $m = 3,0 \pm 0$, $k_w = 40 \pm 15$ мкм/од., максимальний допустимий знос становить 200 мкм (критерій відмови).

Джерелами калібрування є стандарт ISO 281:2007 для підшипників кочення [7]; Hutchings & Shipway (2017) [16] для зубчастих передач. Параметр m залежить від мікроструктури матеріалу: високе значення (3,5) відповідає більш однорідній структурі загартованих сталей; нижчі значення (3,0) – відповідає гетерогенній структурі чавуну.

Кастомізована модель 3 [19, 20, 22] призначена для опису абразивного зношування деталей СГТ в ґрунті:

$$W_{soil} = K_s \cdot \left(\frac{H_{soil}}{H_{mat}} \right)^{1,5} \cdot A_s \cdot L \cdot g(\vartheta, d_s, M_\omega), \quad (5)$$

де K_s – базовий коефіцієнт абразивності ґрунту; H_{soil} – твердість абразивних частинок (~800 HV); H_{mat} – твердість матеріалу деталі; A_s – площа контакту деталі з абразивною частинкою; L – пройдена відстань.

При цьому калібровані параметри відповідно дорівнюють:

- $K_s = (2,0 \pm 0,8) \times 10^{-7}$ – для суглинкового ґрунту (30...40% піску);
- $H_{soil} = 800 \pm 100$ HV – твердість абразивних частинок;
- приймаються наступні умови калібрування: вологість ґрунту 15...25%, швидкість 6...10 км/год, глибина 10...15 см;
- вважаємо, що значення поправочної функції дорівнюють: $g(\vartheta, d_s, M_\omega) = 1,0$, при базових умовах $g = 1,5...2$ при підвищеній швидкості (>12 км/год) або піщаних ґрунтах (>60% піску).

Джерелами калібрування є: експериментальні дослідження Natsis et al. [19] та Horvat et al. [20] для лемешів плугів та дисків культиваторів. Показник степеня, рівний 1,5, у співвідношенні твердостей відображає спостережувану нелінійність зносу при абразивно-ґрунтовій дії. Високий інтервал невизначеності (± 40 -50%) обумовлений складністю контролю параметрів ґрунту в реальних умовах.

В даній роботі проведено детальне порівняння УОД, використовуючи альтернативні методики формалізації параметрів деталей: FMEA, CAD/PLM-системи, трибологічні бази даних та IoT-системи моніторингу. Результати порівняльного аналізу відображено у таблиці 2 та на радарній діаграмі (рис. 4). Дослідження проводилися на дванадцяти категоріях деталей: поршневі кільця, зубчасті колеса, підшипники кочення і ковзання, лапи культиваторів, диски різальні, тощо.

Були використані п'ять критеріїв: часова втрата, точність FMEA, сукупність параметрів в описі деталей, адаптація, автоматизація.

Оскільки УОД має найбільший контур, то на рис. 4 свідчить про найбільшу площу покриття. Це стверджує про збалансовану ефективність методу за всіма критеріями. Особливо виділяються показники швидкості розробки (95%), точності прогнозу (90%), повноти опису (95%) та масштабованості (92%).

Таблиця 2 – Результати порівняльного аналізу методик за базовими критеріями

Критерій	FMEA	CAD/PLM	Трибо БД	IoT	УОД
Часовитрата (днів/модель)	8,7	2,7	0,18	6,5	0,11
Точність MAPE (%)	16,8	19,1	4,6	12*	3,2
Сукупність параметрів в описі деталей	15	25	5-10	20	45-50
Адаптація (днів)	4-7	2-4	2-5	3-5	0,06-0,15
Автоматизація (%)	15	26	28	80	88

*IoT без каліброваних моделей; з моделями 4–6%

Джерело: розроблено авторами

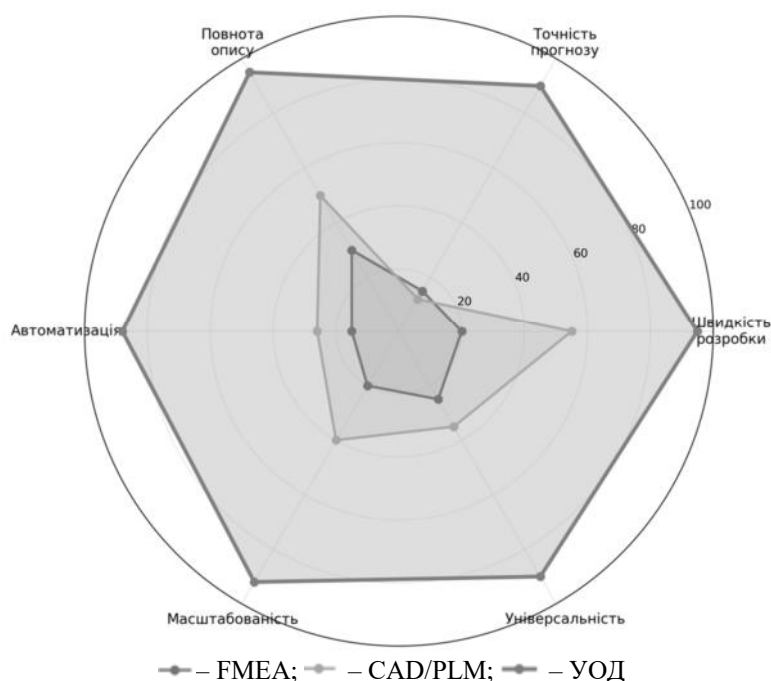


Рисунок 4 – Радарна діаграма порівняння методик формалізації параметрів деталей ТТ і СГТ за критеріями ефективності: швидкість розробки, універсальність, масштабованість, автоматизація, повнота опису, точність прогнозу

Джерело: розроблено авторами

На рис. 5 представлено графічне відображення порівняльного аналізу методик: часовитрата розробки моделі; точність прогнозування MAPE; рівень автоматизації.

Графіки (рис. 5) демонструють той факт, що УОД скорочує час розробки в 79 разів порівняно з методикою FMEA (0,11 vs 8,7 днів), забезпечує точність у 5,3 рази вищу за методикою MAPE: 3,2% vs 16,8%, а також автоматизацію у 5,9 разів вищу: 88% vs 15%.

Аналіз переваг УОД дав можливість виділити наступне:

1. Часовитрата розробки: УОД скорочує час на 94% порівняно з методикою FMEA (від 8,7 до 0,11 днів) завдяки автоматизованому заповненню параметрів з технічної документації без необхідності нових експериментів. Впровадження CAD/PLM-системи вимагають 2,7 днів через необхідність інтеграції експлуатаційних

параметрів, які не є стандартною частиною геометричних моделей.

2. Точність прогнозування: метод УОД досягає MAPE – 3,2% у порівнянні з методом FMEA – 16,8%. Спостерігається покращення в 5,3 рази завдяки використанню каліброваних фізичних моделей та повноті опису експлуатаційних умов. Трибологічні БД показують MAPE – 4,6%, але обмежені специфічними типами контактів та матеріалів [10].

3. Повнота опису: УОД містить 45-50 параметрів порівняно з 15 у методі FMEA та 25 – методик у CAD/PLM. Зазначене забезпечує можливість автоматичного калібрування моделей без додаткових експериментальних даних.

4. Масштабованість: адаптація УОД до нових умов експлуатації вимагає 0,06-0,15 днів (1,5-3,5 години) порівняно з 4-7 днями для FMEA. Це досягається завдяки структурованому формату та можливості автоматичного перекалібрування коефіцієнтів моделей при зміні параметрів блоку 4 (експлуатаційні умови).

5. Автоматизація: 88% операцій у УОД виконуються автоматично: заповнення параметрів з CAD-моделей, вибір механізму зношування, калібрування моделей. У порівнянні з методом FMEA – це 15%, вимагає значного експертного втручання [9].

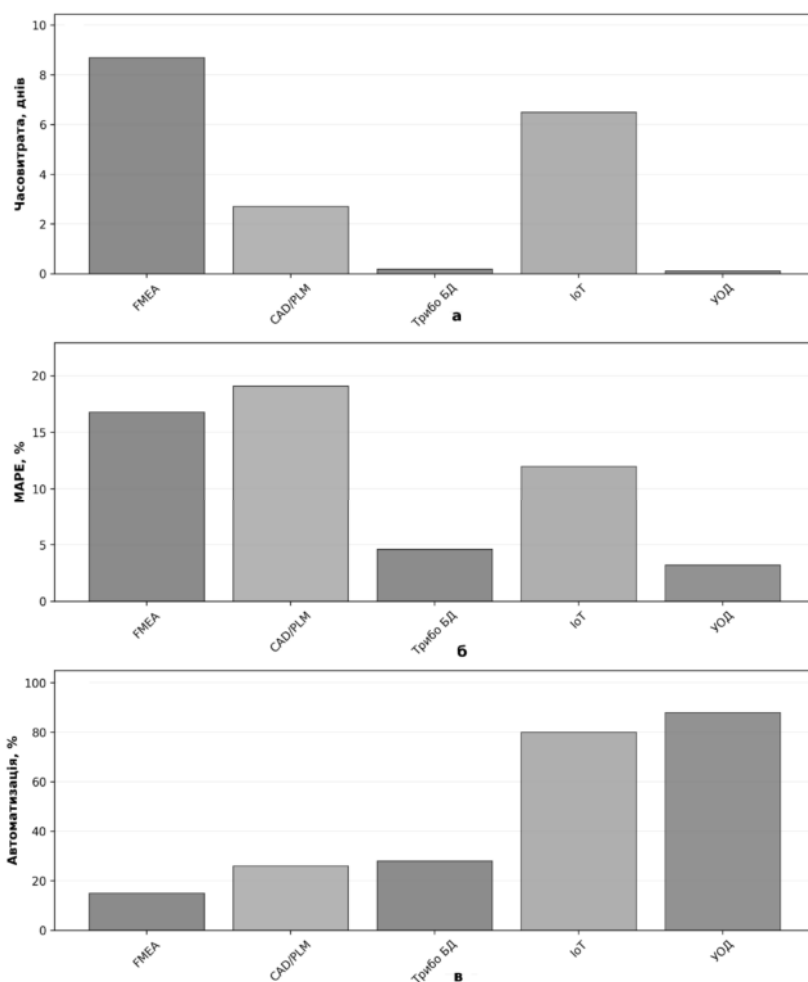


Рисунок 5 – Графічне відображення методик за часовитратою розробки моделі (а), точністю прогнозу MAPE (б) та рівнем автоматизації (в)

Джерело: розроблено авторами

Розроблено блок-схему реалізації методу УОД, що складається з п'яти етапів (рис. 6). Сукупність етапів реалізації методу УОД наступна: формалізація параметрів

деталі через 6 блоків УОД; автоматична класифікація механізму зношування експертною системою; вибір відповідної каліброваної моделі; прогнозування залишкового ресурсу з інтервалом невизначеності; планування технічного обслуговування. Блок-схема демонструє високий ступінь автоматизації (88% операцій) та можливість масштабування на парки від 50 до 500+ одиниць техніки.



Рисунок 6 – Блок-схема реалізації методу УОД, п'ять етапів: від формалізації параметрів до планування технічного обслуговування

Джерело: розроблено авторами

Валідація проведена на 50 одиницях ТТ і СГТ для кожного типу деталі: деталі циліндро-поршневої групи (ЦППГ); зубчастого колеса; підшипника кочення; лапи культиватора; диска різального. Період спостереження складав 1000...5000 годин, Контрольні виміри проводили кожні 500 годин. Використано експлуатаційні дані транспортних та сільськогосподарських підприємств центрального регіону України.

Таблиця 3 – Точність прогнозів залишкового ресурсу (MAPE, %)

Деталь	Фактичний ресурс (год)	FMEA MAPE	CAD/PLM MAPE	Трибо БД MAPE	УОД MAPE
Деталі ЦППГ	2950±200	16,9	N/A	8,1	3,4
Зубчасті колеса	4850±300	16,4	13,2	4,1	2,1
Підшипники кочення	5950±250	11,2	8,4	1,7	0,8
Лапи культиватора	780±120	19,2	24,4	N/A	5,2
Диски різальні	980±140	18,4	28,6	N/A	4,1
Середнє MAPE	-	16,8%	19,1%	4,6%	3,2%

Джерело: розроблено авторами

Діаграма на рис. 7 демонструє порівняння точності прогнозів за методикою MAPE для п'яти типів деталей.

Можна бачити, що метод УОД показує стабільно найнижчі значення MAPE для всіх категорій: 0,8% – для підшипників кочення і ковзання (найкраща точність через контрольовані умови змащування), 2,1% – для зубчастих коліс, 3,4% – для поршневих кілець, 4,1% – для різальних дисків, 5,2% – для лап культиваторів. Вища похибка для деталей СГТ (4,1...5,2%) пояснюється варіативністю ґрунтових умов експлуатації.

Аналіз результатів проведених експериментальних досліджень дав можливість визначити точність за категоріями деталей ТТ і СГТ:

1. Деталі ТТ з контрольованими умовами (підшипники кочення, зубчасті колеса): мали MAPE 0,8...2,1%. Низьку похибку можливо пояснити стабільністю умов змащування, температури та навантаження, що дозволяє точне калібрування моделей.

2. Деталі ТТ з варіативними умовами (деталі ЦПГ): MAPE – 3,4%. Висока похибка обумовлена впливом якості палива, стилю водіння транспортного та циклічності засобу температурного режиму.

3. Деталі СГТ лапи культиваторів, диски різальні): MAPE – 4,1...5,2%. Спостерігаючи найвищу похибку серед досліджених категорій деталей можливо пояснити значною варіативністю ґрунтових умов (піщаність – 30...75%, вологість – 15...25%, наявність каміння).

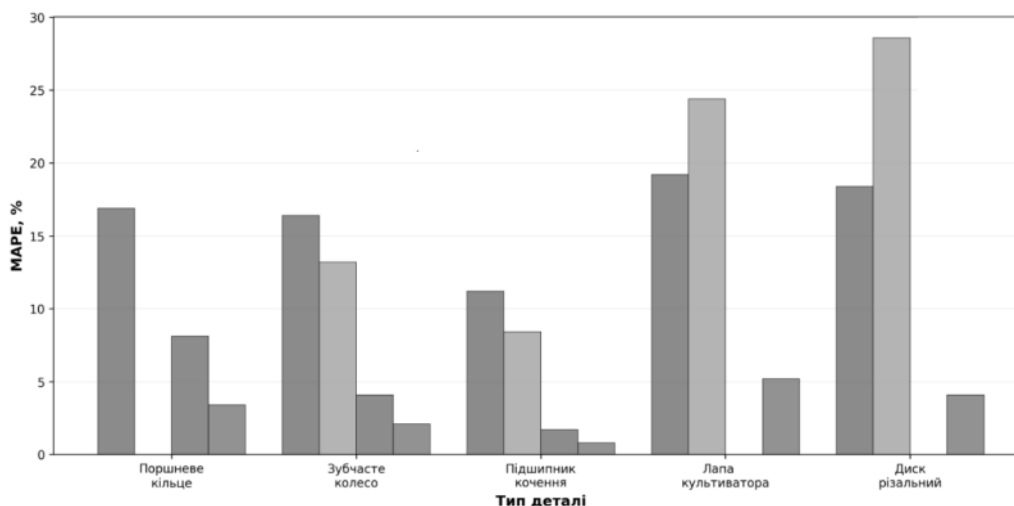


Рисунок 7 – Порівняння точності прогнозування залишкового ресурсу (MAPE) для різних типів деталей за методами: ■ – FMEA, ■ – CAD/PLM, ■ – Трибо БД та ■ – УОД
Джерело: розроблено авторами

Для деталей СГТ за таких умов спостерігаються наступні значення MAPE:

$$MAPE_{\text{ґрунт}} = 4,4 \pm 1,2 \quad (6)$$

Дослідження свідчать, що низькі значення MAPE для УОД досягаються при використанні каліброваних моделей у типових умовах експлуатації. При значних відхиленнях від умов калібрування (наприклад, екстремальні температури $< -30^{\circ}\text{C}$ або $> +50^{\circ}\text{C}$, нестандартні типи ґрунтів з піщаністю $> 80\%$) похибка може зростати до 8-12%. У таких випадках система автоматично розширює інтервал невизначеності прогнозу та рекомендує консервативну стратегію планування операцій технічного обслуговування ТТ і МСГТ.

В дослідженнях виділено наступні статистичні показники валідації:

– коефіцієнт детермінації R^2 – 0,92...0,96 для деталей ТТ, 0,88...0,91 для деталей СГТ;

– RMSE (корінь середньоквадратичної похибки): 85...120 годин для деталей ТТ і 45...65 годин – для деталей СГТ;

– відсоток прогнозів у межах $\pm 10\%$ від фактичного ресурсу становив: 87% – для деталей ТТ і 82% для деталей СГТ.

Валідація підтвердила, що метод УОД забезпечує стабільно високу точність прогнозування для різних типів деталей, механізмів зношування та умов експлуатації без необхідності повторного калібрування моделей, що описують властивості деталей ТТ і СГТ.

Визначено що запропонований метод УОД розроблений з урахуванням можливості інтеграції у три основні категорії систем:

1. CAD/PLM-платформи [12].

Метод УОД може бути інтегрований як додатковий модуль у системи CREO, Solidworks, Siemens NX через стандартні API. Параметри блоків 1-3 (ідентифікація, матеріали, геометрія) автоматично заповнюються з CAD-моделей та специфікацій матеріалів. Блок 4 (експлуатаційні умови) заповнюється інженерами на етапі проектування або імпортується з систем моніторингу при експлуатації ТТ і СГТ.

Визначено наступні переваги інтеграції:

- автоматичне генерування методу УОД для нових деталей ТТ і СГТ на етапі проектування;

- прогнозування ресурсу до виготовлення прототипу;

- оптимізація конструкції та вибору матеріалів на основі цільового ресурсу;

- формування технічної документації з розрахунковими термінами ТО.

2. IoT-системи моніторингу.

Метод УОД використовується як структурований опис статичних параметрів деталей ТТ і СГТ, що доповнює динамічні дані з датчиків (вібрація, температура, тиск олії). Експертна система УОД автоматично вибирає відповідну модель зношування, яка налаштовується в реальному часі на основі телеметричних даних.

Визначено наступні переваги інтеграції:

- поєднання фізичного моделювання з методами машинного навчання [17];

- адаптивне уточнення коефіцієнтів моделей на основі фактичних даних зносу;

- раннє виявлення аномалій через порівняння фактичного та прогнозованого зносу;

- зменшення потреби в навчальних даних для ML-моделей.

3. Системи управління технічним обслуговуванням (CMMS).

Метод УОД забезпечує структуроване джерело даних для автоматичного планування ТО на основі прогнозованого залишкового ресурсу. Система автоматично генерує наряди на обслуговування при досягненні порогових значень зносу (зазвичай 70...80% від граничного).

Спостерігаються наступні переваги інтеграції:

- перехід від планованого до прогностичного ТО (зниження витрат на 25...40%);

- оптимізація запасів деталей на основі прогнозів відмов;

- групування ТО для мінімізації простоїв техніки;

- формування процесу експлуатації для уточнення моделей.

Метод УОД можна реалізувати як JSON/XML-структура з схематичною валідацією полів. Це забезпечить машиночитаемість та можливість обміну даними між різними системами ТТ і СГТ без втрати інформації.

Масштабованість методу УОД може бути підтверджена тестуванням технічного стану машин на автотранспортному та сільськогосподарському підприємствах. При масштабуванні зберігається лінійна залежність обчислювальних витрат від кількості одиниць техніки, що робить систему придатною для великих ТТ і МСГТ.

Висновки

1. Розроблено та валідовано метод універсальної формалізації параметрів ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки. Запропонований метод інтегрує матеріалознавчі, геометричні, експлуатаційні та надійнісні параметри деталей машин в єдину структуровану форму. Показано, що метод дозволяє заповнення технічної документації без нових експериментів, обов'язково специфікуючи технічний стан деталей, стан матеріалу (термообробка),

умови експлуатації техніки та метрологічні параметри. Структура з 6 блоків та 58 параметрів забезпечує повноту опису деталей машин для автоматизованого прогнозування їх залишкового ресурсу та машин в цілому.

2. Розроблена експертна система класифікації, що автоматично визначає домінуючий механізм зношування (абразивне, втомне, корозійне, адгезійне, комбіновані) на основі параметрів методу універсальної формалізації з точністю 92% порівняно з експертною оцінкою. Показано, що система дозволяє автоматизувати вибір відповідної фізичної моделі деталей машин без експертного втручання. Сформульовані правила класифікації для п'яти механізмів з ваговими коефіцієнтами 0,5...0,9 та довірчими інтервалами $\pm 25...50\%$.

3. Проведене порівняльне дослідження продемонструвало суттєві переваги запропонованого методу універсальної формалізації параметрів деталей машин:

- часовитрата: метод значно скорочує час розробки моделі (до 0,11 днів) порівняно з FMEA (8,7 днів) та CAD/PLM (2,7 днів) за рахунок автоматизованого заповнення параметрів з технічної документації;

- точність: MAPE метод становить – 3,2% порівняно з FMEA – 16,8% (у 5,3 рази точніше) та CAD/PLM – 19,1% (у 6 разів точніше) при стабільних умовах експлуатації;

- масштабованість: адаптація до нових умов експлуатації за 0,06...0,15 днів (vs 4...7 днів – для FMEA та 2...4 днів – для CAD/PLM) завдяки структурованому формату параметрів деталей досліджуваних машин;

- автоматизація: 88% операцій можуть виконуватись автоматично (vs 15% – для FMEA та 26% – для CAD/PLM) через машиночитасмий формат даних

4. Проведена валідація на отриманих реальних експлуатаційних даних (50 одиниць транспортної і сільськогосподарської техніки для кожного типу деталі, 1000...5000 годин) підтвердила надійність методу: MAPE для деталей транспортної техніки становить 3,2...4,4%, а для деталей сільськогосподарської техніки – 4,4...5,2% навіть при варіаціях умов експлуатації при використанні каліброваних моделей. Виявлено, що калібровані моделі демонструють інтервали невизначеності порядку $\pm 30...50\%$, залежно від стабільності умов, що враховується при плануванні технічного обслуговування через застосування консервативних стратегій прогнозування.

5. Універсальність запропонованого методу підтверджена апробацією на дванадцяти категоріях деталей (підшипники, зубчасті передачі, деталі циліндро-поршневої групи, сільськогосподарські компоненти) з різними матеріалами (чавун, сталь 45, загартовані сталі, станами термообробки та механізмами зношування без модифікації структури запропонованого методу. Показано, що метод універсального опису деталей можливо застосувати на деталях будь-яких типів без змін їх формалізованої структури. Метод реалізовано у вигляді блок-схеми з п'яти етапів з автоматизацією 88% операцій.

6. Визначено можливість інтеграції в сучасні системи: метод універсального опису деталей успішно інтегрується в CAD/PLM-платформи (CREO, Solidworks), IoT-системи та ML-моделі завдяки структурованому, машиночитасмому формату параметрів (JSON/XML).

7. Основними напрямками подальших досліджень є: розширення бази каліброваних моделей для специфічних умов експлуатації (агресивні середовища), інтеграція методів машинного навчання для автоматичного уточнення коефіцієнтів моделей на основі телеметричних даних, розробка стандартизованих протоколів обміну методу між різними CAD/PLM-платформами та системами моніторингу, впровадження методу у навчальний процес для підготовки фахівців з предиктивного обслуговування деталей транспортної та сільськогосподарської техніки.

Список літератури

1. Mobley, R. Keith. *An introduction to predictive maintenance*. R. Keith Mobley. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 532 p.
2. Lee, J., Kao, H.-A., Yang, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and Big Data environment. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 16. P. 3–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
3. Аулін В. В., Костенко С. І., Мартиненко О. О., Баранов В. Л. Кіберфізичний підхід у створенні транспортних та виробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Т. 3, № 34. С. 331–343. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343)
4. Zhang, B., Zhang, L., Li, W., Gao, L., Zhang, Z. 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.2018.12.016>
5. ISO 6336-1:2006. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2006. 109 p. URL: <https://www.iso.org/standard/36327.html>
6. Archard, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953. Vol. 24, No. 8. P. 981–988. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
7. ISO 281:2007. Rolling bearings: dynamic load ratings and rating life. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2007. 51 p. URL: <https://www.iso.org/standard/38102.html>
8. Hochreiter, S., Schmidhuber, J. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780. URL: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
9. Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. de, Basto, J. P., Alcalá, S. G. S. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 137. P. 106024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
10. Tran, K. P. Artificial intelligence for smart manufacturing: methods and applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 16. P. 5584. URL: <https://doi.org/10.3390/s21165584>
11. Чумак В. М., Аулін В. В., Мартиненко О. О., Костенко С. І. Підвищення зносостійкості та надійності ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки методами інженерної оптимізації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Т. 11, № 42, ч. 2. С. 143–159. URL: [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)
12. Stark, J. Product lifecycle management (Volume 1): 21st century paradigm for product realisation. 4th ed. Cham : Springer, 2015. 406 p. (Decision Engineering). URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98578-3>
13. Carlson, C. S. Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2012. 480 p. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118312575>
14. Bhushan, B. Modern tribology handbook. 1st ed. Boca Raton : CRC Press, 2000. 1720 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9780849377877>
15. Meng, H. C., Ludema, K. C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*. 1995. Vol. 181–183. P. 443–457. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2)
16. Hutchings, I., Shipway, P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081009109/tribology>
17. Shao, S., et al. Highly Accurate Machine Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2446–2455. URL: doi.org/10.1109/TII.2018.2864759
18. Zum Gahr, K. H. *Microstructure and Wear of Materials*. Amsterdam : Elsevier, 1987. 560 p. URL: https://www.academia.edu/82805296/Karl_Heinz_Zum_Gahr_Microstructure_and_Wear_of_Materials
19. Natsis A., Papadakis G., Pitsilis J., Karamoutis C. The influence of soil type, soil water and share sharpness of a mouldboard plow on energy consumption, speed of operation and ploughing quality. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1999. Vol. 72, No. 2. P. 171–176. URL: doi.org/10.1006/jaer.1998.0360
20. Horvat Z., Filipovic D., Kosutic S., Emert R. Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*. 2008. Vol. 41, No. 8. P. 778–782. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.008>
21. Zheng J., Li W., Li J. A comparative study on the wear behavior of quenched-and-partitioned steel (Q&P) and martensite steel (Q&T). *Coatings*. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 727. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings14060727>
22. Bayhan Y. Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. *Tribology International*. 2006. Vol. 39, No. 6. P. 570–574. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.06.005>
23. Davis J. R. (ed.) *Alloying: Understanding the Basics*. Materials Park: ASM International, 2001. 647 p. URL: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976>
24. Hutchings I., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081009109/tribology>
25. Williams J. A. *Engineering Tribology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 511 p. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805905>
26. Тищенко С. Ю., Сергійчук А. А., Аулін В. В., Гриньків А. В. Методи визначення потреб підприємств автосервісу в запасних частинах та розробка методики їх впливу на загальну працездатність автомобілів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: збірник наукових праць*. Кропивницький: ЦНТУ, 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 243–257.

27. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. [та ін.] Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: науковий журнал*. Харків: ХНТУСГ, 2020. № 22. С. 162–174. DOI: <https://doi.org/10.37700/ts.2020.22.162-174>
28. Сергійчук А. А., Гриньків А. В., Аулін В. В. Розробка інноваційної системи управління якістю технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів на основі процесного підходу. *Крамаровські читання: збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 20–21 лютого 2025 р.)*. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2025. С. 145–147.
29. Гриньків А. В., Аулін В. В. Елементно-модульна система технічного обслуговування і ремонту мобільної сільськогосподарської техніки. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (м. Тернопіль, 29–30 вересня 2022 р.)*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 103–104.

References

1. Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50002-8>.
2. Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>.
3. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Cyber-physical approach in the creation of transport and production systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 3(34), 331–343. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343) [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.2018.12.016.
5. ISO 6336-1:2006. (2006). *Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors* (2nd ed.). International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/36327.html>.
6. Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>.
7. ISO 281:2007. (2007). *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life* (2nd ed.). International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38102.html>.
8. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
9. Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>.
10. Tran, K. P. (2021). Artificial intelligence for smart manufacturing: Methods and applications. *Sensors*, 21(16), 5584. <https://doi.org/10.3390/s21165584>.
11. Chumak, V. M., Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Lysenko, S. V., & Kuzyk, O. V. (2025). Improvement of wear resistance and reliability of resource-determining parts of transport and agricultural machinery by methods of engineering optimization. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, part 2), 143–159. [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) [in Ukrainian].
12. Stark, J. (2015). *Product lifecycle management (Volume 1): 21st century paradigm for product realisation* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98578-3>.
13. Carlson, C. S. (2012). *Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118312575>.
14. Bhushan, B. (2000). *Modern tribology handbook* (1st ed.). CRC Press. doi.org/10.1201/9780849377877.
15. Meng, H. C., & Ludema, K. C. (1995). Wear models and predictive equations: Their form and content. *Wear*, 181–183, 443–457. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2).
16. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780081009109/tribology>.
17. Shao, S., McAleer, S., Yan, R., & Baldi, P. (2019). Highly accurate machine fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2446–2455. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2864759>.
18. Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials*. Elsevier. https://www.academia.edu/82805296/Karl_Heinz_Zum_Gahr_Microstructure_and_Wear_of_Materials.
19. Natsis, A., Papadakis, G., & Pitsilis, J. (1999). The influence of soil type, soil water and share sharpness of a mouldboard plow on energy consumption, speed of operation and ploughing quality. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2), 171–176. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0360>.
20. Horvat, Z., Filipović, D., Kosutic, S., & Emert, R. (2008). Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*, 41(8), 778–782. doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.008.
21. Zheng, J., Li, W., & Li, J. (2024). A comparative study on the wear behavior of quenched-and-partitioned steel (Q&P) and martensite steel (Q&T). *Coatings*, 14(6), 727. <https://doi.org/10.3390/coatings14060727>.
22. Bayhan, Y. (2006). Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. *Tribology International*, 39(6), 570–574. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.06.005>.

23. Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Alloying: Understanding the basics*. ASM International. doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976.
24. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780081009109/tribology>.
25. Williams, J. A. (2005). *Engineering tribology*. Cambridge University Press. doi.org/10.1017/CBO9780511805905.
26. Tyshchenko, S. Yu., Serhiichuk, A. A., Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2025). Methods for determining the needs of car service enterprises for spare parts and developing a methodology for their impact on the overall performance of vehicles. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Papers*, 11(42), Part 1, 243–257. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.243-257](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.243-257) [in Ukrainian].
27. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., et al. (2020). Principles of construction and functioning of a cyber-physical system for technical service of automotive and mobile agricultural machinery. *Technical Service of the Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes: Scientific Journal*, (22), 162–174. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.22.162-174> [in Ukrainian].
28. Serhiichuk, A. A., Hryn'kiv, A. V., & Aulin, V. V. (2025). Development of an innovative quality management system for vehicle maintenance and repair based on the process approach. In *Kramarov Readings: Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference* (Kyiv, February 20–21, 2025) (pp. 145–147). Kyiv: Publishing Center of NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian].
29. Hryn'kiv, A. V., & Aulin, V. V. (2022). Element-modular system of maintenance and repair of mobile agricultural machinery. In *Processes, Machines and Equipment of Agro-Industrial Production: Problems of Theory and Practice: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Ternopil, September 29–30, 2022) (pp. 103–104). Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].

Vitaliy Chumak, Yehor Manko, Viktor Baitsan, Viktor Aulin, Prof., Dr. Tech. Sci.,
Serhii Lysenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Hryn'kiv**, Sr. Researcher, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

A Universal Method for Formalizing Parameters of Resource-Determining Parts of Transport and Agricultural Machinery for Predictive Maintenance Systems

It is shown that in the era of the fourth industrial revolution and comprehensive digitalization of production complexes, the task of ensuring operational stability and extending the service life of critical components of automotive and agro-industrial equipment is becoming critically important. It is established that classical methods of assessing the performance of equipment, which are based on regulated service terms, do not satisfy the current needs of production profitability and operational safety. The key issue is identified - the lack of a unified system for structuring parts parameters: existing methods (FMEA, CAD/PLM systems, specialized tribological databases) are characterized by high specificity and do not allow scaling predictive models to arbitrary types of components without significant experimental costs.

Methods for universal formalization of parameters of resource-determining parts in the form of a universal description of parts (UDP), which combines material science, geometric, operational and reliability parameters into a single structured form, are proposed. It is shown that the UDP integrates an explicit specification of operating conditions, material state and wear measurement methods. An expert system has been developed that automatically classifies the dominant wear mechanism according to the UDP parameters and selects the appropriate calibrated physical models: Archard models for abrasive wear, Palmgren-Miner model for fatigue wear and a customized model for wear in soil.

A comparative study of UDP with alternative approaches (FMEA, CAD/PLM, tribological DB, IoT) has been conducted on twelve categories of parts of transport (PT) and agricultural machinery (AGM). It has been found that UDP significantly reduces the time for developing predictive models and increases the accuracy of the residual resource forecast: MAPE UDP – 3.2%; FMEA – 16.8% for stable operating conditions. At the same time, universality of application without modification of the structure and scalability of adaptation to new types of parts are ensured.

Validation on real operational data of 50 units of equipment for each type of part for 1000...5000 hours confirmed the reliability of the method: the average absolute percentage error MAPE was 3.2...4.4% for transport parts of PT and 4.4...5.2% for AGM parts with variations in operating conditions when using calibrated models in typical conditions. The results confirm the possibility of integrating UDP into predictive maintenance systems and CAD/PLM platforms to provide scalable solutions for determining the remaining service life of PT and AGM parts.

universal part description, predictive maintenance, parameter formalization, comparative analysis of methods, wear mechanisms, residual life prediction, physical wear models, expert system, calibrated models

Одержано (Received) 07.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 656

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.220-235](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.220-235)

Volodymyr Volkov¹, Prof., DSc., **Ihor Taran**², Prof., DSc., **Viktor Vojtov**³, Prof., DSc.,
Tetiana Volkova¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Nataliia Berezhna**³, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

²*Dnipro University of Technology, Kharkiv, Ukraine*

³*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

e-mail: volf-949@ukr.net

Technology for Controlling the Serviceable Condition of Vehicles in Operation

The existing model of technical exploitation of cars in Ukraine is analyzed. It is proved that the transition to an “adaptive” system of vehicle maintenance and repair allows using of built-in on-board diagnostics, existing satellite navigation and mobile communication systems, and modern information technologies for remote assessment of their performance. It is shown that the use of the *Torque* software module is the first step towards the *FRACAS* system and, accordingly, *IPR/CALS/PLM* technologies. An experimental verification of the proposed technology was carried out and the results of assessing the performance of a C-segment passenger car in operation were obtained.

car, serviceable condition, technical operation of cars, adaptive maintenance and repair system, operating conditions, method, mathematical model, monitoring

Problem statement. Automobile transport (AT) is the most important sector of the Ukrainian economy, which serves almost all sectors of the economy and segments of the population, contributes to the growth of mobility and quality of life.

Currently, the Ukrainian vehicle fleet includes more than 14 million vehicles, the structure of which is as follows [1, 2]: trucks - 15.5%, buses - 2.6%, cars - 81.9%.

Technical exploitation of automobiles (TEA), as defined by [3], is one of the most important ATs, which is a set of organizational and technical measures to ensure the maintenance of automobile performance.

The existing system of maintenance and repair (M&R) was formed on the basis of a simplified model of transport infrastructure functioning: the car mainly operated with reference to its own enterprise. At the same time, the entire service and repair base was concentrated within a particular road transport enterprise (PJSC) and all types of technical interventions were carried out by it. The existing system of MRO is inflexible in terms of ensuring the trouble-free operation of the vehicle during operation, which is manifested in the uniformity of the approach to vehicles of different ages: the list of operations and the frequency of MRO are identical for a new vehicle and for a vehicle before its refurbishment and write-off. Such a system of vehicle maintenance and repair provides for average mileage rates and labor intensity of their technical impacts and allows for the application of a number of adjustment factors for a particular vehicle, which leads to a significant increase in costs to maintain their performance.

The gradual development of new types of transportation led to an increase in the time spent by vehicles away from the main production base, and, as a result, the role of preventive maintenance of vehicles increased. Therefore, the creation of a flexible “adaptive” system for monitoring and managing the technical condition of a vehicle with elements of an individual approach to each specific vehicle has become a priority [4].

Due to the use of built-in on-board diagnostics in cars, the development of satellite navigation and mobile communication systems, and modern information technologies, it is now possible to carry out remote monitoring and assess the level of vehicle performance. This, in turn, makes it possible to move to an “adaptive” system of vehicle maintenance and repair, the key point of which is the development of information and communication technologies and relevant information software systems (ISC) that provide remote receipt of the necessary current information from vehicles, its processing and development of corrective actions during maintenance and repair through monitoring.

An adaptive vehicle maintenance and repair system is a system that can adapt to changes in internal and external conditions by changing its structure and parameter values. The level reached by modern technical diagnostics (TD) allows for the implementation of almost any task to detect and predict the technical condition of vehicles during TEA. For example, the adaptive system proposed in [5] provides for the need to carry out maintenance and repair according to an individual program. Such maintenance and repair is conventionally called individual maintenance (IM). The type of work in this case is assigned based on individual diagnostic data.

The purpose of the article is to improve the technology for assessing the serviceability of vehicles in operation.

Analysis of recent research and publications. The emergence of “systems with full responsibility” in transport, for example, in aviation, such as FADEC (Full Authority Digital Electronic Control system) [6], allows to neutralize the existing difficulties. The FADEC concept is aimed at creating a unified structure of on-board systems for controlling the work processes of units and assemblies, monitoring and diagnostic systems, systems for organizational and functional support of vehicle operation processes, which allows the formation of information systems for organizational and functional support (collection, analysis and management of information flows) of operation processes, that is, allows the implementation of IPR/CALS/PLM technologies in practice.

IPM / CALS / PLM technologies, i.e., information support for the supply and life cycle (LC) of products, is a modern approach to the design, manufacture and operation of high-tech and high-tech products, which consists in the use of modern information technologies at all stages of the LC of products [6]. In the field of public road transport companies (PTCs), the integrated information environment of IPR / CALS / PDM technologies is only being implemented. An example is the Torque software module as the basis of the “automotive” FADEC concept, which is the first step towards the FRACAS system and, accordingly, IPE / CALS / PLM technologies, which are designed to receive and display diagnostic information of the onboard self-diagnostic system. Today, it already “knows” how to display the current operating parameters of the engine, other systems, components and assemblies, display and decode “error codes”, “erase errors” from the electronic control unit (ECU), automatically send the values of the parameters controlled by the sensor to the integrated electronic information meta-space, where within six months you can see not only the current values of the controlled values at different times, but also see the entire route of cars during this period on the map [6].

No less important for IPE / CALS / PLM technologies at AT are such simple (in terms of the tasks performed at AT) electronic information systems as GPS-Trace Orange, M2M, CCWT, Teletrack, Dynafleet® [6].

Statement of the problem. To achieve the goal, it is necessary:

- to employ a systemic interaction “driver – vehicle – road environment (DVR), which includes the following monitoring components: the vehicle (including driver and the onboard information complex, OIC); the operating conditions of the vehicle (road, traffic,

atmospheric–climatic conditions and work culture), the transport infrastructure, and the infrastructure of highways;

- to form a unified information model that describes the vehicle's interaction in terms of parameters of its technical state obtained via the OIC; and the driver, linked to the process of transforming information about technical-state parameters and to processes depending on the driver's physiological capacities, the technical data of the vehicle, and the degree of their resistance to negative influences from the external environment; and the vehicle's operating conditions;

- by means of morphological analysis to distinguish the features of the monitoring information system for different vehicles under operating conditions;

- to perform an experimental verification and obtain results regarding the operation of the authors' proposed information–software complexes for assessing the functional state of the vehicle under operational conditions.

Summary of the main material. The use of cars in non-stationary operating conditions requires constant monitoring of their actual condition, carrying out the necessary technical maintenance actions to ensure proper working condition. Such an interpretation of the conditions of use of cars is possible only through monitoring of their technical condition, which is based on the processing of a priori information, continuous diagnosis and forecasting of the parameters of their technical condition. In this regard, there is a problem of ensuring a full-fledged connection between the processes of car operation and the parameters of operating conditions [7], as well as generalization and improvement of methods for predicting their technical condition [8]. Most of the tasks in the process of forming a method for assessing vehicle performance, which are solved by technical services of vehicle operation, have an information component of assessment: road conditions of vehicle operation, longitudinal profile (terrain), type and condition of road surface; repair, construction and maintenance of road infrastructure facilities; their monitoring; predicting possible emergencies, transport conditions in terms of traffic saturation and intensity, cargo characteristics, traffic mode and speed; atmospheric and climatic conditions, fuel consumption, vehicle operation culture, etc. [6].

The formation of a model for assessing technical condition parameters is based on a general approach to the study of the classical “driver-vehicle-road environment” (DVRE) system, which includes the systematic interaction of the monitoring components: a car with a driver and an onboard information complex (OIC); vehicle operating conditions (road, transport, atmospheric and climatic conditions and work culture) [3]; transport infrastructure and road infrastructure (Fig. 1).

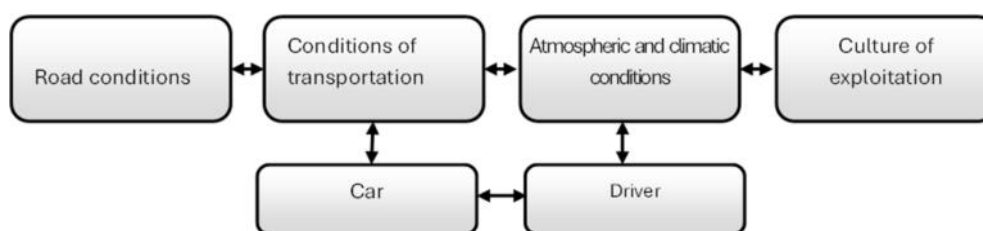


Figure 1 - General scheme of system interaction of the DVRE system in the context of ITS
Source: compiled by the authors

The process of controlling the technical condition of a car under operating conditions is the process of forming a single information function that describes the interaction of a car in the form of parameters of the technical condition of the car obtained using BINIC; the driver, which is associated with the process of transforming information about the parameters

of the technical condition and processes that depend on the physiological capabilities of the driver, the technical data of the car and the degree of their counteraction to negative environmental influences; vehicle exploitation conditions [7, 14] and the interaction of models of transport infrastructure and road infrastructure parameters. Formally, this mapping has the form [9, 10]:

$$\begin{array}{ccc}
 \Omega_{TC} = F(\Omega_{TC} + \Omega_{IoV}) & \begin{array}{l} F_{TC \rightarrow ECCE+IoV} \\ F_{CE \rightarrow TCCE} \end{array} & \\
 \Omega_{CE} & \xrightarrow{\quad} & \Omega_{TCCE} \\
 \Omega_{TI, HI} = F(\Omega_{TI} + \Omega_{HI}) & \begin{array}{l} F_{TC \rightarrow ECCE+IoV} \end{array} &
 \end{array} \quad (1)$$

where Ω_V is a set of models of vehicle technical condition parameters, as $\Omega_V = F(\Omega_V + \Omega_{DV})$ system interaction of vehicle and driver technical condition parameters, which in turn is associated with the process of transforming information about vehicle technical condition parameters and processes that depend on human physiological capabilities, vehicle technical data and the degree of their resistance to negative environmental influences; Ω_{DV} is a set of models of the car driver's state; Ω_{CE} is a set of models of the parameters of the car operating conditions; $\Omega_{TI, HI} = F(\Omega_{TI} + \Omega_{HI})$ is a set of models of the parameters of the transport infrastructure and road infrastructure; Ω_{TCCE} is a set of models of the parameters of the technical condition of the car under the relevant operating conditions; $F_{TC \rightarrow TCCE+DV}$ - functional display of models of parameters of the technical condition of the vehicle and its driver; $F_{V \rightarrow VCE}$ - functional display of models of parameters of the technical condition of the vehicle; $F_{TI, HI \rightarrow TI+HI}$ - functional display of models of parameters of transport infrastructure and road infrastructure.

We consider it expedient to combine into the set of models of Ω_{TC} parameters of the technical condition of the vehicle under operating conditions exactly Ω_{TC} in interaction with Ω_{DV} . In this case, we proceed from the fact that the functioning of a single system of car and driver $F(\Omega_{TC} + \Omega_{DV})$ changes under operating conditions in the form of technical and economic indicators of the car. At the same time, we understand that the system adapts to different operating conditions by changing its operational properties [7]. Also, we consider it expedient to combine all environmental influences on the car in the form of changes in the models of operating conditions, models of parameters of transport infrastructure and road infrastructure in the form of a set of models Ω_{CE} of parameters of car operating conditions. Based on the foregoing, in a general unified form, the process of monitoring the technical condition of a car under operating conditions is a process of transforming information about the state and processes of the car's functioning and operating conditions. In the process of analysis and synthesis, formation of possible variants of schemes of the information system for monitoring cars in operation in terms of ensuring the following: identification of the car, collection of data on the technical condition of the car, monitoring and forecasting the parameters of its technical condition, identification of the conditions of its operation, diagnosis of its condition, verification of compliance with its condition, morphological analysis was used [9, 10].

The peculiarity of this analysis is that in the experimental system of DVRE, to form the basic morphological formula of the information system for monitoring a car in operation, several characteristic features of functional elements (morphological features) were identified, for each of which the most complete list of various relevant technical expressions of the above features was previously compiled [3]. For each morphological feature, the

characteristic properties of classifications, vehicle design features, monitoring system components, operating conditions, etc. are given, on which the solution of the research problem and the achievement of the main goal of the functioning of the DVRE system in operating conditions depend.

In the morphological matrix of the schemes of the information system for monitoring a car in operation, 12 features are allocated for the functional element "Car (V)", with 4 additional features for the classification element "passenger car", 1 for the classification element "bus"; 2 features for the classification element "truck". For the functional element "Vehicle engine (V)" 4 features are allocated. For the functional element "Equipping the vehicle with information and communication equipment" - 3 features. For the functional element "External networks" - 1 feature in 4 variants. For the functional element "Monitoring of vehicle condition and exploitation conditions", 3 features are also identified. For each of the 23 morphological features of the system, the main variants of their implementation (from 2 to 10) were selected. Changing the constructive expression of a particular variant of any of the 23 features forms a new scheme for providing an information system for monitoring vehicles in exploitation conditions.

In accordance with the provisions of [9], the research method is based on the morphology of the component objects of the monitoring system and allows systematic analysis of various structures of the object - the monitoring system, which follow from the regularities of their structure.

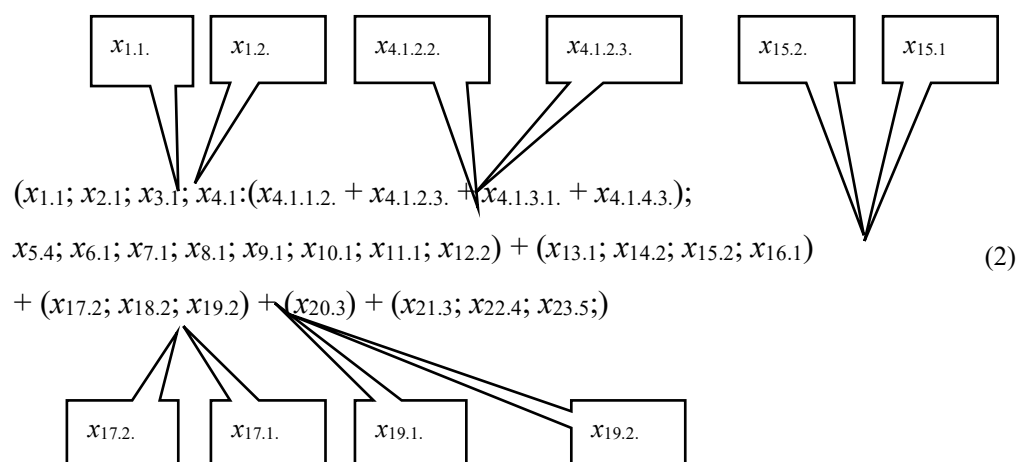
The number of possible schemes of the information system for monitoring a vehicle under exploitation conditions in the case of using the created morphological matrix is:

- for a passenger car: $N = 8 \cdot 4 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 = 4,749 \cdot 10^{13}$;

- for a bus: $N = 8 \cdot 4 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 = 1,691 \cdot 10^{12}$;

- for a truck: $N = 8 \cdot 4 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 = 2,368 \cdot 10^{13}$, and for one variant of the vehicle when using the morphological matrix in terms of its equipment with information and communication equipment, external networks, monitoring its condition and exploitation conditions: $N_I = 768$. For a similar variant with the additional use of the morphological matrix in the part of the vehicle engine: $N_{II} = 12288$.

Thus, the scheme of the monitoring information system for a passenger car of the C segment with a gasoline engine under exploitation conditions includes the following combinations of certain features:



When formulating possible variants of the information system for monitoring vehicles in operation, the scheme is considered as an effective way to ensure their efficiency, which today form the basis of the existing fleet of cars, trucks and buses in Ukraine.

Modern on-board systems for monitoring technical condition parameters in *ITS* conditions allow for the identification of vehicles, continuous automatic measurement of parameters characterizing their technical condition, diagnostics, namely, monitoring the performance of vehicles and its components, recognizing and preventing the development of failures in its operation, and ultimately ensuring the functioning of an adaptive system of vehicle maintenance and repair according to technical condition [3]. The work of the developed *IPC IdenMonDiaOperCon* “HNADU-16”, regarding the state and exploitation conditions of cars includes a set of stationary and mobile (on-board systems for the car, vehicle) systems for collecting and transmitting information.

The basic principle of information exchange between *ITS* elements, namely the vehicle and the transport infrastructure, is that the vehicle is not only an object of control and management, but also a source of constantly updated information about the state of its exploitation conditions. That is, it is a modern control and measurement system that accumulates and stores information about the technical condition of the vehicle, the conditions of its exploitation within the traffic area, and also makes decisions in case of detection of a dangerous, emergency situation or malfunction.

The general task of forming a methodology for applying the classification of vehicle exploitation conditions in the information environment of *ITS*, as a complex system, is based on obtaining information about the actual technical condition, methods and means of its implementation in solving specific scientific and technical problems, evaluation, verification.

Providing a system of information on the exploitation conditions (*EC*) of the vehicle $S_{EC.EV_i}(t)_i$ built on the basis of server solutions $S_{EOV_i}(t)_i$ according to the principles of [4, 12], a local source of information $S_{ECVd_i}(t)_i$ and network databases $S_{EC.Net_i}(t)_i$:

$$S_{EC.EV_i}(t)_i = (S_{ECV_i}(t)_i, S_{ECVd_i}(t)_i, S_{EC.Net_i}(t)_i). \quad (3)$$

This makes it possible to create a single centralized repository of information distributed in space, support a multi-user environment for obtaining information (editing), the ability to access remote users, systematize information and visualize it in a single complex. In the process of developing information support for the processes of monitoring the parameters of the technical condition of the vehicle, taking into account the operating conditions, the available sources of information were collected in terms of the vehicle's coordinates on the ground in real time, a model of the road, models of road infrastructure facilities, territorial natural and man-made systems, and the results of vehicle tracking. Sources of information to ensure the operation of the information system for monitoring the technical condition of a car are presented in [14].

In the process of studying and evaluating the conditions of vehicle exploitation, a geographic model of a highway in *Torque*, *Yandex.Maps* [8] was used, which was the basis of the analysis system and is a layer of linear objects with parameters of information interaction:

$$F_{ts}(RV_{Road})_i = (Ident_{RV_i}, Cat_{RV_i}, Cod_{Dil_i}, Distanse_{Descr_i}, Type_{RVn_i}, Type_{Roadn_i}, Track_{V_i}),$$

where $F_{ts}(RV_{Road})_i$ - information is similar to the relevant parameters of the technical condition of the vehicle under the relevant operating conditions at the appropriate time for the

road information system; $Ident_{RV_i}$ - identifier i of the vehicle's driving area; Cat_{RV_i} - category i of road; Cod_{Dil_i} - code of the road section, $Distance_{Descr_i}$ - description of the road section, $Type_{RVn_i}$ - number of traffic lanes, $Type_{Roadn_i}$ - type of road surface, $Track_{V_i}$ - width of the traffic lane.

The information model of a car's position on a road was developed on the basis of a geographical model of the road. Each section of the model is described by the following vector of parameters:

$$F_{ts}(RV_{Traffic})_i = (Ident_{RV_i}, Ident_{PRoute_i}), \quad (5)$$

where $Ident_{RV_i}$ – identifier of i the vehicle's driving area; $Ident_{PRoute_i}$ – identifier of sections of the vehicle's route.

The route sections of the information model of the car's position on the road are used to form the route. It represents a certain path of movement of the car, realized as a linear object and accompanied by the following vector of parameters:

$$F_{ts}(RV_{Marshrut})_i = (Ident_{RV_i}, Ident_{Route_i}), \quad (6)$$

where $Ident_{RV_i}$ – identifier i of the vehicle's driving area; $Ident_{Route_i}$ – identifier of the vehicle's route.

The high-speed model of vehicle driving modes is a table of linear events superimposed on the driving route and has the following structure:

$$\begin{aligned} F_{ts}(RV_{RouteProperties})_i = \\ = (Ident_{RV_i}, Ident_{Route_i}, RouteProperty_i, Ident_{SR_i}, \\ Coordinate_{First_i}, Coordinate_{End_i}, Value_{V_i}, Date_i, Base_{Speed_i}) \end{aligned} \quad (7)$$

where $Ident_{RV_i}$ - identifier i of the vehicle's driving area; $Ident_{Route_i}$ - identifier of the vehicle's route; $RouteProperty_i$ - type of vehicle route; $Ident_{SR_i}$ - identifier of the section of the vehicle's high-speed mode; $Coordinate_{First_i}$ - the beginning of the high-speed section of the vehicle; $Coordinate_{End_i}$ - the end of the section of the high-speed mode of movement of the car; $Value_{V_i}$ - the established permissible speed of the vehicle; $Date_i$ - date of setting the vehicle speed; $Base_{Speed_i}$ - the established (base) speed on the vehicle's movement area.

Along with the road model, the information model can describe the coordinates of road infrastructure objects. With the help of the ISM map, it is possible to record the coordinates and features of the impact on vehicle traffic in the operation of bridges, crossings, traffic lights, etc. Also, the peculiarities of the exploitation conditions are influenced by the existing adjacent man-made objects or natural territorial systems. All of the above objects are typified by characteristics and contain a parameter for assessing the impact on the processes of vehicle movement and its exploitation conditions.

In the process of studying the operating conditions of a vehicle in interaction with the driver of the vehicle and the ISS, it is possible to solve the problems of road, transport and

atmospheric and climatic conditions. At the same time, the condition of the road, road infrastructure facilities and adjacent territory is assessed.

The assessment of the type and condition of the road surface is carried out as a result of processing the data of the remote survey of the driver using the on-board OIC and then an assessment of the type and condition of the road surface during the operation of the vehicle is formed. The parameters that characterize road conditions, according to which the classification signs of limiting the permissible speed or closing the traffic of vehicles are: longitudinal profile of the road, altitude, width of the roadway and pavement condition, wheel adhesion, etc. The data on the types and magnitude of defects are compared with the standard indicators for vehicle speed, the degree of deviation is determined, and a score is formed for the state of road conditions (based on the condition of the road surface):

$$O_p(t)_i = (O_{p_1}, O_{p_2}, O_{p_3}), \quad (8)$$

where O_{p_1} - excellent and good condition, O_{p_2} - satisfactory condition, O_{p_3} - unsatisfactory condition.

To determine the value of the assessment in the TPC of the analyzed road surface section, a table of point events is formed, containing a point assessment of the state of road operating conditions for each detected defect, of the following form:

$$F_{ts}(Event_{Point})_i = (Ident_{RV_i}, Date_i, Distans_i, Defect_i, Discribe_i), \quad (9)$$

where $Ident_{RV_i}$ - identifier i of the vehicle movement area; $Date_i$ - date of setting the speed of the vehicle; $Distans_i$ - distance from the starting point of the route (linear coordinate); $Defect_i$ - point estimate of the defect; $Discribe_i$ - type of defect.

Combining the estimates of the pavement condition according to the detected defects is carried out for the sections of the high-speed model of vehicle traffic modes in accordance with the expression of the form:

$$O_{p_i}(t)_i = \max_{j=1..N} O_{p_{ij}}(t)_i, \quad (10)$$

where $O_{p_{ij}}(t)_i$ - is the score of the j -th defect on the i -th section of the model of vehicle speed regimes; N - the number of defects found on the site; t - time factor.

The condition of transport infrastructure facilities is assessed as a result of inspections and audits. This determines whether the detected defects affect traffic safety and whether special attention should be paid to the condition of these facilities. The assessment is carried out by drivers in the process of moving vehicles, other participants in vehicle monitoring and road users. The results of inspections and checks are entered into the database of measured parameters and ISM objects. Each transport infrastructure object is characterized by a vector of parameters:

$$\begin{aligned} F_{ts}(RV_{TransInfluence})_i &= \\ &= (Ident_{RV_i}, Type_i, Discribe_i, Objectid_i), \\ &= (ObjectId_i, DateUpdate_i) \end{aligned} \quad (11)$$

where $Ident_{RV_i}$ - identifier i areas of vehicle movement; $Type_i$ - type of transport infrastructure object (transport crossings, transport constructions, roadside structures, etc.); $Discribe_i$ - description of the transport infrastructure object; $Objectid_i$ - identifier of the

transport infrastructure object; $ObjectId_i$ - assessment of the condition (impact indicator) of the transport infrastructure object; $DateUpdate_i$ - date of assessment.

The assessment of the condition of transport infrastructure objects in accordance with regulatory documents is carried out according to a three-point system:

$$O_c(t)_i = (O_{c_1}, O_{c_2}, O_{c_3}), \quad (12)$$

where O_{c_1} - normal condition, O_{c_2} - needs attention, O_{c_3} - needs to be repaired.

A fragment of the map showing the possibility of identifying transport infrastructure facilities using *ISS* based on *ISM* and allowing to identify objects that have a direct impact is presented in [8]. Combining assessments of the state of transport infrastructure objects based on the results of impact is carried out by sections of the high-speed model of traffic modes in accordance with the expression:

$$O_{c_i}(t)_i = \max_{j=1..N} O_{c_{ij}}(t)_i, \quad (13)$$

where $O_{c_{ij}}(t)_i$ - is the score of the j -th object on the i -th section of the model of vehicle speed regimes, N - number of objects found on the site; t - time factor.

Assessment of the condition of the adjacent road territory is carried out as a result of the analysis of the level of danger of natural and man-made objects on the condition of the road surface and traffic, taking into account their distance from the road. The level of danger is assessed by drivers in the process of vehicle movement, other participants in monitoring vehicles and road users as a result of periodic inspections, and the impact assessment is formed on a three-point scale:

$$O_t(t)_i = (O_{t_1}, O_{t_2}, O_{t_3}), \quad (14)$$

where O_{t_1} - low impact, O_{t_2} - medium impact, O_{t_3} - high impact.

The third category is assigned to hazardous industries located near a highway that require repair or reconstruction work that is likely to cause emergencies on the road in the conditions of vehicle operation. These can also be natural emergencies (collapses, landslides, mudslides). The presence of such objects requires adjusting the speed limit on the road section.

The assessment of fuel consumption by cars under exploitation conditions is carried out on the basis of server solutions and a local source of information in the process of comparing with the linear norms of car fuel consumption established by regulatory indicators [3, 11], and is determined by the dependence:

$$Q = \frac{g_e}{36000 \cdot \rho_m \cdot \eta_m} \cdot \left(G \cdot \psi + \frac{\kappa \cdot F \cdot V^2}{13} + \frac{G}{g} \cdot \delta_j \cdot j \right) \quad (15)$$

where g_e - specific fuel consumption; ρ_m - fuel density; η_m - mechanical efficiency of the transmission; G - Gross vehicle weight; ψ - coefficient of total road resistance; $\kappa \cdot F$ - streamlining factor; V - speed of the vehicle; δ_j - a coefficient that takes into account the influence of the inertia of rotating parts of the vehicle; j - vehicle acceleration.

An approach to the application of the classification of vehicle exploitation conditions in the ITS information environment in the process of forming the general information support of the monitoring system for assessing the parameters of the vehicle's serviceable condition, built on the basis of server solutions, a local source of information (car, driver, etc.) and network databases, is proposed [12, 13]. This approach ensures the full collection and processing of information in real time from the BINC placed on the vehicle and from the information collection system working in conjunction with the driver and transport infrastructure based on the current state of road, transport, climatic exploitation conditions and technical constructions, in the processes of comparison with regulatory data and data of previous control; displaying the situation on the road section and the results of the analysis in real time and on request; identification of pre-emergency and emergency road conditions; archiving of monitoring results; development of recommendations for the speed regime on road sections based on the results of the analysis.

To implement the “adaptive system” of maintenance and repair in the TEA, the following information and software systems (“ISS”) were developed and experimentally tested at KhNADU: “Virtual mechanic “HADI-12”, “Service Fuel Eco ‘NTU-HADI-12’, ‘MonDiaFor ‘HADI-15”, “IdenMonDiaOperCon ‘HNADU-16’ [15, 16, 17, 18], which are integrated into the system of the virtual PJSC ‘KhNADU - TECA’ for processing the received data. ISS operate in the context of intelligent transport systems (ITS) and have the organizational and functional capabilities to manage the operation of PJSC, assess the impact of exploitation conditions on the technical condition and environmental safety of the vehicle, the current state and the ability to predict the vehicle's performance, as well as to assess the technical and economic performance of the vehicle.

Experimental verification and results of the ISS operation to assess the vehicle's serviceable condition in operation. The main object of experimental research on monitoring technical condition parameters is a passenger car of the C segment (Fig. 2) equipped with information monitoring devices between ITS elements.



Figure 2 - Segment C car during monitoring of parameters technical condition under exploitation conditions

Source: developed by the authors

The structure and interconnection of the functionality of the OIC for obtaining information on the operating conditions of vehicles within the virtual Road Transport Enterprise are given in [19]. It provides for information exchange between the elements of the ISS ITS of a vehicle to perform a remote study of rapidly changing work processes of vehicle exploitation in the process of changing operating conditions [19]. The system interaction is based on the following main functions of the BINC, namely, determining the position of the

vehicle (tracking the position of the vehicle), monitoring the parameters of its technical condition, solving the problem of assisting the driver in the process of its exploitation, ensuring the transport safety of the vehicle.

The functioning of the main functions of the BINC is ensured by the fulfillment of its functions through the systematic interaction of the vehicle design features and the constituent elements of the ITS. The results of monitoring the parameters of the technical condition of the vehicle under operating conditions by means of ITS are shown in Figure 3.

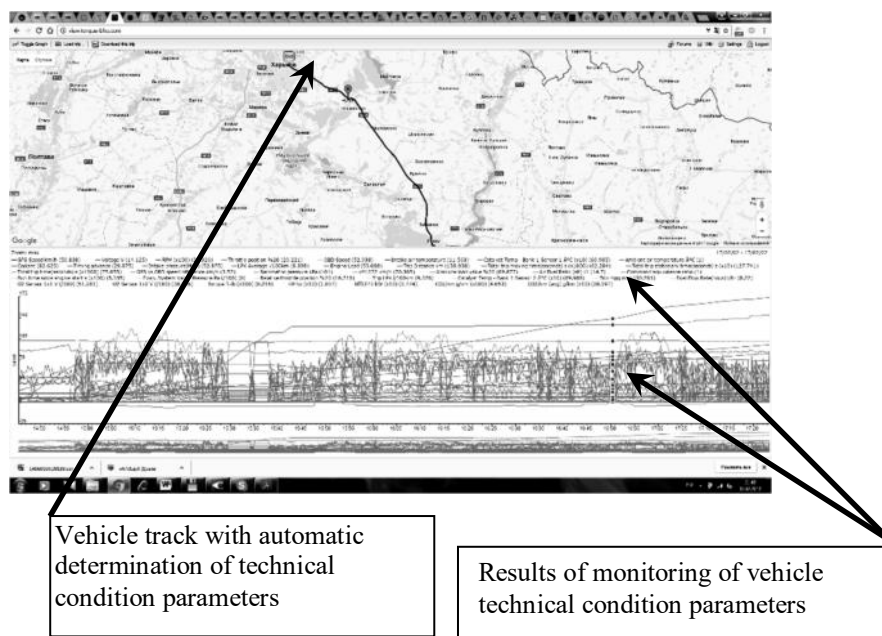


Figure 3- *Torque* working window with parameters for monitoring vehicle technical condition parameters
Source: developed by the authors

The working window of the *Torque* software module (Fig. 3) displays the current parameters of the vehicle engine, other units and systems, “error codes” from the vehicle's ECU, automatically sends the values of the parameters controlled by the sensor to the integrated electronic information meta-space, where within a set time it is possible to see not only the values of the controlled values at different times, but also to see on the map the entire route of the vehicle for the set period [20]. The reports allow you to find out where the vehicle was located, where and at what time the vehicle's scanner-communicator could not get in touch, etc. The service has the following types of tracks: tracking the vehicle track on the map (Fig. 4); export to .gpx format; export to .xls format. If the event line is highlighted in red, it is possible to drain the fuel, and if it is highlighted in green, it is possible to refuel.

The process of diagnosing and determining the fault status of the vehicle using DTCs was carried out automatically according to the algorithm developed by the authors using the *Torque* module within the developed ISS in ITS conditions. The final report on the results of diagnosing the technical condition and determining the status of faults in interaction with the user's computer through the ISS can also be accessed in the form of a summary table - DTCs of the vehicle [20].

The speed of the vehicle has a great influence on the main technical and economic indicators of work. It is known [4] that the determination of the average technical speed of a vehicle is possible if there is a total mileage of the vehicle S on the speedometer and the travel time t_{mov} . The relative coefficient of change of speed (RCCS) of a vehicle, which is adopted as

the main criterion for determining a group of operating conditions and further adjusting the terms of MRO, can be determined by the following dependence:

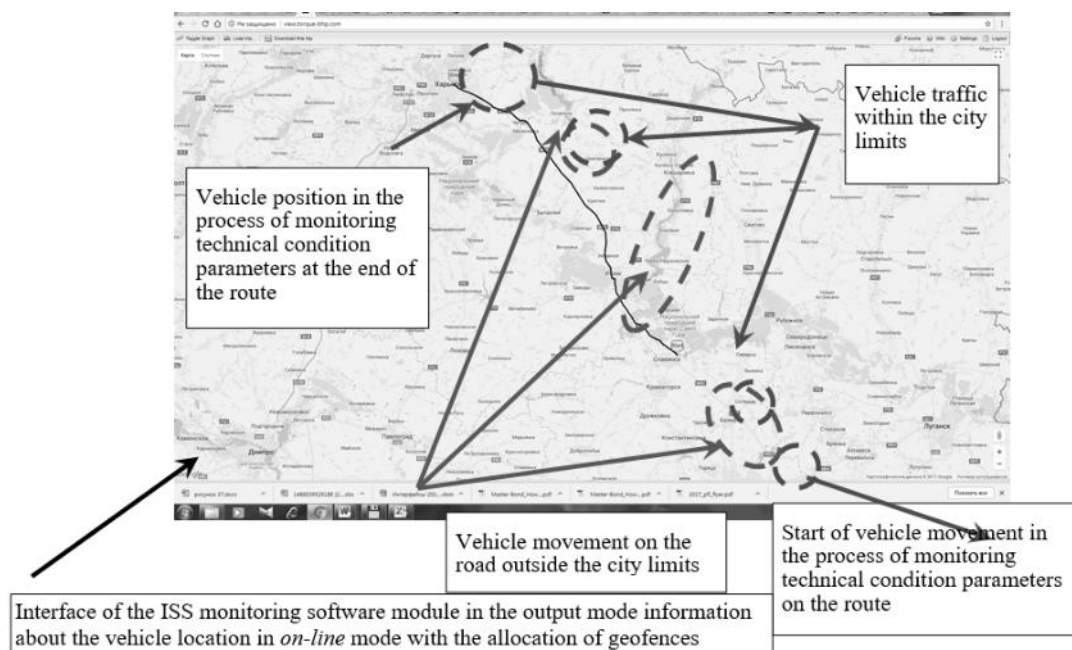


Figure 4 - Formation of geozones of the experimental site

Source: developed by the authors

$$K_C = S / (t_{\text{mov}} \cdot V_{a1}) \approx 1.43 \cdot S / (t_{\text{mov}} \cdot V_{\text{max}}), \quad (16)$$

where V_{a1} – the speed of this car on the road of the 1st group ($0,7 \cdot V_{\text{max}}$).

Let's analyze the results of the study on the example of one vehicle route on the sections of driving distance using geophones (Fig. 4).

In this case, the determination of the vehicle speed in the conditions of operation by ITS was carried out in several stages. We formed 8 geofences with the coordinates of the beginning and end of the movement. The vehicle speed in the geofences was set in accordance with the provisions of [5]. To generate the final report on the movement of the vehicle and determine the operating conditions of the vehicle by speed, we analyzed and determined the technical and economic performance indicators (fuel consumption) and parameters of the technical condition of the vehicle under the relevant operating conditions as a result of monitoring by ITS.

The results of a detailed analysis of the vehicle movement conditions and the determination of the initial data for further calculation of the parameters were presented by comparing the monitoring results (Fig. 5) and as a result of processing the research protocol, a change in the vehicle speed was obtained.

Figure 6 shows a diagram of changes in vehicle speeds depending on the section (Fig. 5), obtained on the basis of the analysis of the report, where for each section we calculated (in the order of calculation) according to the following dependencies:

$$V_{\text{med}} = S_{\Sigma i} / t_{\Sigma \text{mov } i} \quad (17)$$

$$V_{\text{med}} = S_{\Sigma i} / (t_{\text{mov}} + t_{\text{park}})_{\Sigma i} \quad (18)$$

$$V_{\text{med}} = \Sigma (S_i / t_{\text{mov } i}) / n_i \quad (19)$$

$$V_{\text{med}} = \Sigma (S_i / (t_{\text{mov}} + t_{\text{park}})_i) / n_i \quad (20)$$

$$V_{med} = \sum V_{GPS\ med\ i} / n_i \quad (21)$$

$$V_{med} = \sum V_{OBD\ med\ i} / n_i \quad (22)$$

where V_{med} - medium speed of the vehicle within the driving distance; $S_{\Sigma i}$ - is the sum of the distances of the i sections; $t_{\Sigma mov\ i}$ - Σ vehicle movement time at i - sections within the driving distance; $(t_{mov} + t_{park})_{\Sigma i}$ - Σ time of movement of the vehicle and stopping, parking at i -th sections within the distance of movement; n_i - number of polling stations; $V_{GPS\ med\ i}$ - is the average GPS speed of the vehicle within each i -th section received from the report; $V_{OBD\ i}$ - is the average OBD speed of the vehicle within each i -th section, which was obtained from the report.

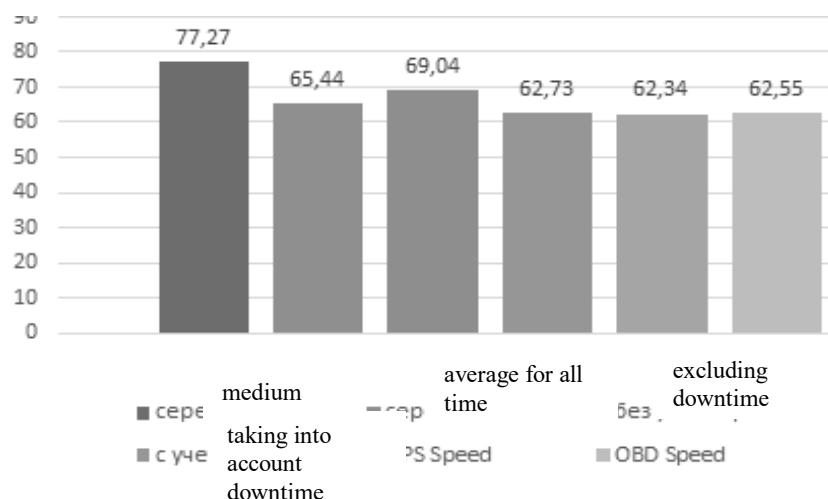


Figure 5 - Results of determining the change in the average speed of the vehicle based on the results of processing the report

Source: developed by the authors

The results of the change in fuel consumption depending on the distance and time of movement of the vehicle are shown in Figure 7. As a result, we obtained the average fuel consumption of the vehicle for the entire distance of movement, taking into account geozones, which is equal to $G_{med} = 7.23$ l/h. This value is chosen as the actual fuel consumption of the vehicle.

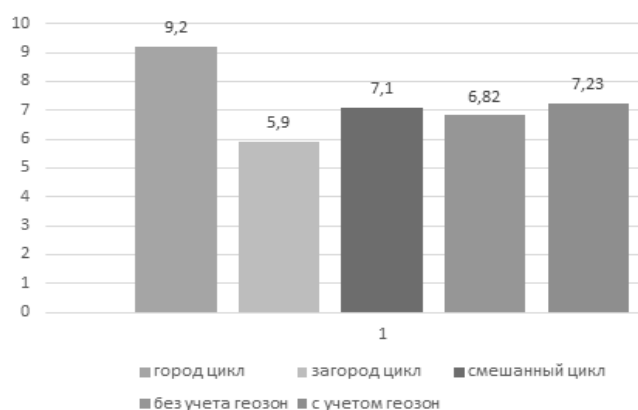


Figure 6 - Results of determining the change in vehicle fuel consumption during movement based on the results of report processing

Source: developed by the authors

Figure 7 shows the definition and research of the RCCS. The peculiarity of the

definition of RCCS is as follows:

- 2 V_{max} speeds were selected as the maximum speed limits in the relevant section, taking into account the formed geozones, respectively: a - the maximum possible V_{max} speed of the research vehicle on the road of group 1 (outside the city) - 130 km/h; b - the maximum possible V_{max} speed of the research vehicle on the road of group 1 (in the city) - 60 km/h.

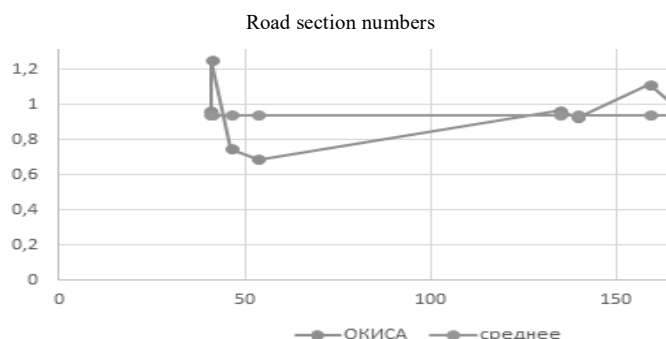


Figure 7 - Results of the study of RCCS at the experimental site depending on the distance of the path

Source: developed by the authors

Vehicle RCCS for each site, taking into account geophones: determined by the following dependence

$$K_{m\ m} = S_{\text{section } i} / (t_{\text{mov}} \cdot V_{\text{a med section } i}), \quad (22)$$

The average value of the RCCSR was determined as the average for the entire distance of the vehicle movement. As a result of the study, we obtained a value of $K_{m\ m} = 0.94$, which belongs to the first group of operating conditions [4], $K_{m\ m}$ varied on sections of the vehicle's path within the range of $K_{m\ m} = 0.69-1.25$.

Conclusions. In connection with the analysis of the state of the *TEA*, it can be concluded that the traditional system of maintenance and repair, which has been formed in road transport for many years, no longer meets modern requirements.

A new technique for road transport in assessing the operability of vehicles is the creation of information systems for organizational and functional support of their operation processes. The introduction of new basic principles of the "adaptive" system of management of the operability of vehicles in the *TEA* is the development of an information and communication system and a base of forecast models that provide, through monitoring, remote receipt of the necessary current information from vehicles and its processing, as well as the development of corrective actions.

An information technology for monitoring the state and operating conditions of vehicles is formed, the general information support of the system is proposed, and the following are described: processes for researching and assessing vehicle operating conditions; information model of vehicle position; speed model of vehicle traffic modes. In addition, the means of assessing: the type and condition of the road surface; the condition of transport infrastructure facilities; the condition of the adjacent road territory; vehicle fuel economy in exploitation conditions, as well as the algorithm for adjusting the vehicle speed are presented. The method for assessing the serviceability of vehicles in exploitation conditions has been improved. To implement it, the work of the structured information model of the ISS "IdenMonDiaOperCon 'HNADU-16'" was tested, which makes it possible to assess the technical and economic performance and parameters of the technical condition of the vehicle under operating conditions on the example of assessing the average speed of the vehicle and fuel consumption. The assessment of exploitation conditions was carried out according to the value of the RCCS in accordance with the provisions of the theory of vehicle exploitation.

List of References

1. Транспорт і зв'язок України за 2014 рік. Київ: Консультант, 2015. 222 с.
2. *Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія*. Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут / за заг. ред. А. М. Редзюка. Київ: ДП «Державтотранс НДІпроект», 2005. 400 с.
3. Лудченко О. А. *Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: підручник*. Київ: Знання-Прес, 2003. 511 с.
4. Волков В. П., Волкова Т. В., Горбик Ю. В. Сучасний стан автомобільного транспорту і напрям розвитку технічної експлуатації автомобілів. *Автошляховик України*. 2022. № 2(270). С. 26–33.
5. Волков В. П., Матейчик В. П., Грицук І. В. та ін. *Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія*. Харків: Вид-во НТМТ, 2015. 246 с.
6. *Моніторинг технічного стану автомобіля в життєвому циклі* / В. П. Волков, В. П. Матейчик, І. В. Грицук та ін.; за заг. ред. В. П. Волкова. Харків: ХНАДУ, 2017. 301 с.
7. Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В. Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Транспортне машинобудування*. 2017. № 14(1236). С. 10–20.
8. Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В. Особливості інформаційної системи моніторингу і прогнозування параметрів технічного стану двигуна і транспортного засобу в умовах ITS. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2016. № 2(6). С. 43–49.
9. *Програмне забезпечення систем моніторингу транспорту* / М. Д. Дмитриченко, В. П. Матейчик, О. К. Грицук та ін. Київ: НТУ, 2016. 204 с.
10. *Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб.* / М. Ф. Дмитриченко, В. П. Матейчик, О. К. Грицук [та ін.]. Київ: НТУ, 2014. 168 с.
11. Грицук І. В. *Концепція забезпечення оптимального температурного стану двигунів і транспортних засобів в умовах експлуатації: автореф. дис. докт. техн. наук*. Харків, 2016. 40 с.
12. Матейчик В. П., Волков В. П., Грицук І. В. [та ін.] Особливості моніторингу і визначення статусу несправностей транспортного засобу у складі бортового інформаційно-діагностичного комплексу. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ: НТУ, 2014. Вип. 30. С. 51–62.
13. Scania. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.scania.com/group/en/boosting-uptime-scania-remote-diagnostics/>.
14. Грицук І. В., Грицук Ю. В., Волков Ю. В., Калашніков Є. Є. Особливості розробки математичних моделей оцінювання поточного і прогнозування параметрів технічного стану автомобіля. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛНТУ, 2017. Вип. 45. С. 44–51.
15. *Технічний регламент програмного продукту “Віртуальний механік “HADI-12””* / В. П. Волков, О. Б. Комов, П. Б. Комов та ін. Свідцтво про реєстрацію авторського права №47233 від 15.01.2013. 3 с.
16. *Технічний регламент програмного продукту “Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»”* / В. П. Волков, В. П. Матейчик, П. Б. Комов [та ін.]. Свідцтво №53292 від 24.01.2014. 3 с.
17. *Технічний регламент і результати роботи інформаційного програмного комплексу “MonDiaFOR HADI-15” (ITS)* / В. П. Волков, І. В. Грицук, О. В. Предко [та ін.]. Свідцтво №64765 від 04.04.2016. 3 с.
18. *Технічний регламент і результати роботи програмного комплексу “IdenMonDiaOperCon HNADU-16” (ITS)* / В. П. Волков, І. В. Грицук, Ю. В. Грицук [та ін.]. Свідцтво №75506 від 22.12.2017. 3 с.
19. Матейчик В. П., Волков В. П., Грицук І. В. [та ін.] Особливості моніторингу і визначення статусу несправностей транспортного засобу у складі бортового інформаційно-діагностичного комплексу. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ: НТУ, 2014. Вип. 30. С. 51–62.
20. Ситник В. Ф., Краснюк М. Т. *Інтелектуальний аналіз даних (дейтамайнінг): навч. посібник*. Київ: КНЕУ, 2007. 376 с.

References

1. Transport and Communication of Ukraine for 2014. (2015). Kyiv: Konsultant [in Ukrainian].
2. Redziuk, A. M. (Ed.). (2005). *Automobile Transport of Ukraine: State, Problems and Development Prospects*. Kyiv: Derzhavtotrans NDІproekt [in Ukrainian].
3. Ludchenko, O. A. (2003). *Technical Maintenance and Repair of Automobiles*. Kyiv: Znannia-Pres [in Ukrainian].
4. Volkov, V. P., Volkova, T. V., & Horbik, Yu. V. (2022). Current state of road transport and directions of development of vehicle technical operation. *Avtozhliakovyk Ukrainy*, 2(270), 26–33 [in Ukrainian].
5. Volkov, V. P., Mateichyk, V. P., Hrytsuk, I. V. et al. (2015). *Intelligent Transport Monitoring Systems*. Kharkiv: NTMT [in Ukrainian].
6. Volkov, V. P. (Ed.), Mateichyk, V. P., Hrytsuk, I. V. et al. (2017). *Monitoring of the Technical Condition of a Vehicle in the Life Cycle*. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
7. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., & Hrytsuk, Yu. V. (2017). Features of forming the methodology for applying the classification of vehicle operating conditions in ITS information environment. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Transportne mashynobuduvannia*, 14(1236), 10–20 [in Ukrainian].
8. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., & Hrytsuk, Yu. V. (2016). Features of the information system for monitoring and forecasting the parameters of the technical condition of the engine and vehicle in ITS conditions. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(6), 43–49 [in Ukrainian].
9. Dmytrychenko, M. D., Mateichyk, V. P., Hryshchuk, O. K. et al. (2016). *Software for Transport Monitoring Systems*. Kyiv: NTU [in Ukrainian].

10. Dmytrychenko, M. F., Mateichyk, V. P., Hryshchuk, O. K. et al. (2014). *Methods of System Analysis of Motor Vehicle Properties*. Kyiv: NTU [in Ukrainian].
11. Hrytsuk, I. V. (2016). *Concept of Ensuring the Optimal Thermal State of Engines and Vehicles under Operating Conditions* (Extended abstract of Doctor's thesis). Kharkiv [in Ukrainian].
12. Mateichyk, V. P., Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V. et al. (2014). Features of monitoring and determining the status of vehicle malfunctions as part of an onboard information and diagnostic complex. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 30, 51–62 [in Ukrainian].
13. Scania. (n.d.). Boosting uptime with Scania remote diagnostics. <https://www.scania.com/group/en/boosting-uptime-scania-remote-diagnostics/>.
14. Hrytsuk, I. V., Hrytsuk, Yu. V., Volkov, Yu. V., & Kalashnikov, Ye. Ye. (2017). Features of developing mathematical models for assessing the current and forecasting the parameters of the technical condition of a vehicle. *Naukovi notatky*, 45, 44–51 [in Ukrainian].
15. Volkov, V. P., Komov, O. B., Komov, P. B. et al. (2013). *Technical regulations of the software product "Virtual Mechanic HADI-12"* (Certificate of copyright registration No. 47233, January 15, 2013) [in Ukrainian].
16. Volkov, V. P., Mateichyk, V. P., Komov, P. B. et al. (2014). *Technical regulations of the software product "Service Fuel Eco NTU-HADI-12"* (Certificate No. 53292, January 24, 2014) [in Ukrainian].
17. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Predko, O. V. et al. (2016). *Technical regulations and performance results of the information software complex "MonDiaFOR HADI-15" (ITS)* (Certificate No. 64765, April 4, 2016) [in Ukrainian].
18. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Hrytsuk, Yu. V. et al. (2017). *Technical regulations and performance results of the software complex "IdenMonDiaOperCon HNADU-16" (ITS)* (Certificate No. 75506, December 22, 2017) [in Ukrainian].
19. Mateichyk, V. P., Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V. et al. (2014). Features of monitoring and determining the status of vehicle malfunctions as part of an onboard information and diagnostic complex. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 30, 51–62 [in Ukrainian].
20. Sytnyk, V. F., & Krasniuk, M. T. (2007). *Intelligent Data Analysis (Data Mining)*. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].

В. П. Волков¹, проф., д-р техн. наук, **І. О. Таран**², проф., д-р техн. наук, **В. А. Войтов**³, проф., д-р техн. наук, **Т. В. Волкова**¹, доц., канд. техн. наук, **Н. Г. Бережана**³, доц., канд. техн. наук.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Харків, Україна

³Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

Технологія контролю працездатного стану автомобілів в умовах експлуатації

Виконано аналіз технології моніторингу технічного стану автомобілів під час експлуатації. Проведено аналіз існуючої моделі технічної експлуатації автомобілів в Україні. Існуюча модель технічного обслуговування і ремонту сформована на основі спрощеної системи функціонування транспортної інфраструктури і вже не відповідає вимогам часу.

Новим методом оцінки справного стану транспортних засобів є створення інформаційних систем організаційно-функціональної підтримки їх експлуатації. Перехід до «адаптивної» системи технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів дозволяє використовувати вбудовані засоби бортової діагностики, існуючі мережі супутникової навігації та мобільного зв'язку, а також сучасні інформаційні технології для дистанційної оцінки рівня їх працездатності. Використання програмного модуля *Torque* в удосконаленні технології моніторингу експлуатаційних характеристик транспортних засобів як основи «автомобільної» концепції *FADEC* є першим кроком на шляху до системи *FRACAS* і, відповідно, технологій *IPV/CALS/PLM*. Модель оцінки рівня експлуатаційних характеристик транспортного засобу враховує дорожні умови експлуатації транспортного засобу в частині висоти дороги над рівнем моря, поздовжнього профілю, типу та стану дорожнього покриття; ремонт, будівництво та утримання об'єктів дорожньої інфраструктури; їх моніторинг; прогнозування можливих аварійних ситуацій; умови дорожнього руху в частині насиченості та інтенсивності руху транспортних засобів, характеристик вантажу, режиму та швидкості руху; атмосферно-кліматичні умови, експлуатаційну витрату палива, культуру експлуатації транспортного засобу.

У статті представлено удосконалений метод оцінки працездатності транспортних засобів в експлуатації. Проведено експериментальну перевірку запропонованої технології та отримано результати оцінки працездатності легкового автомобіля С-сегменту в експлуатації.

автомобіль, працездатний стан, технічна експлуатація автомобілів, адаптивна система ТО і Р, умови експлуатації, метод, математична модель, моніторинг

Одержано (Received) 06.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

УДК 656.025

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.236-243](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.236-243)**Ів. Б. Гевко¹**, проф., д-р техн. наук, **О. Л. Ляшук¹**, проф., д-р техн. наук,**Т. А. Довбуш¹**, доц., канд. техн. наук, **Р. В. Хорошун¹**, д-р філос.,**Іг.Б. Гевко²**, канд. техн. наук¹*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*²*Бережанський фаховий коледж НУБіП України, м. Бережани, Україна**e-mail: gevkoivan1@ukr.net*

Проектування трансформаційних причепів для оптимізації площ зберігання в автотранспортних підприємствах

Дослідження присвячено проектуванню трансформаційних причепів для оптимізації площ зберігання в автотранспортних підприємствах. В результаті застосування морфологічного аналізу проведено експертний аналіз трансформаційних причепів, що дозволило отримати певну кількість альтернатив трансформаційних причепів з різними конструктивними ознаками, і, зокрема, з функціями розсування, повертання та виймання, що може створити значні технологічні можливості для мінімізації площ при зберіганні автотранспортних засобів в автотранспортних підприємствах, ефективності збільшення корисного об'єму для акумулювання та транспортування вантажів невисокої густини, та забезпечення нормованого осевого розподілу навантаження при транспортуванні вантажів високої питомої густини з метою дотримання технічних регламентів та підвищення безпеки. На основі згенерованих альтернатив розроблено конструкції трансформаційних причепів, у яких використовуються функціонали розсування, повертання та виймання автономних секцій причепів, на які отримано патент на корисну модель України з функцією розсування та подано заявку на патент України на корисну модель на причеп із функціями розсування та повертання.

проскування, синтез, альтернатива, секція, борт, днище, причеп, автотранспортний засіб

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку автомобілебудування характеризується інтенсивною динамікою, що, також, в повній мірі стосується спеціалізованої техніки, кузовів та причепів автотранспортних та інших засобів. У різних секторах економіки актуалізується необхідність підвищення ефективності логістичних процесів. Це, зокрема, виявляється у потребі при необхідності зміни об'єму для акумулювання і транспортування вантажів різної густини. Крім того, постійне зростання вартості земельних ресурсів в Україні та світі вимагає оптимізації площ для зберігання автотранспорту у автотранспортних підприємствах (АТП). Що, у свою чергу, зумовлює зростання потреб у мінімізації габаритних розмірів автотехнічних та інших транспортних засобів під час простою. Також, доцільно виділити завдання забезпечення оптимального осевого розподілу навантаження при перевезенні вантажів високої питомої густини. Вищезазначені виклики зумовлюють активний пошук й розробку інноваційних та вдосконалених конструкцій причепів автотранспортних засобів (АТЗ), зокрема тих, що передбачають функціонал трансформації власних габаритів за рахунок розсування, зсування, розкладання, складання чи інших видозмін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зростання населення та його потреб стимулює інтенсивний розвиток технологій та, як наслідок, суттєве збільшення парку АТЗ. Це, також, у значній мірі стосується вантажного автотранспорту, що зумовлює формування нових, більш жорстких вимог до конструктивного виконання АТЗ, а також до процедур їх технічного обслуговування, ремонту та умов зберігання. Значна кількість наукових праць [1-12] присвячена дослідженню вищезазначених аспектів, і,

зокрема, проблемам розроблення нових методик проєктування та синтезу з метою отримання ефективних конструктивних альтернатив [13-15]. Однак, проведений аналіз висвітлених досліджень свідчить про існування низки невирішених питань, які потребують подальшого вивчення з метою пошуку та проєктування багатофункціональних вдосконалених кузовів та причепів автотранспортних та інших засобів.

Метою роботи є проєктування трансформаційних причепів для оптимізації площ зберігання в автотранспортних підприємствах.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проведено з метою пошуку нових конструкцій трансформаційних причепів АТЗ, що оптимізують їх експлуатаційні характеристики відповідно до актуальних виробничих та економічних вимог, та їх подальшого розрахунку. При цьому враховувалось, що основними детермінантами для вдосконалення є:

1. Економічна доцільність мінімізації площ для зберігання АТЗ в АТП в умовах зростання вартості земельних ресурсів, що вимагає функціонального зменшення габаритних розмірів автотехніки під час її простою.

2. Технологічна необхідність підвищення ефективності логістики у різних галузях економіки, що виявляється у потребі збільшення корисного об'єму для акумулювання та транспортування низько- та середньощільних вантажів.

3. Забезпечення нормованого осевого розподілу навантаження при транспортуванні вантажів високої питомої густини з метою дотримання технічних регламентів та підвищення безпеки.

Вирішення зазначених завдань вимагає пошуку та впровадження інженерних рішень, які передбачають трансформацію геометрії кузова за рахунок механізмів розсування-зсування або розкладання-складання, що забезпечує адаптивну зміну габаритів відповідно до поточних експлуатаційних потреб.

Розробка зазначених трансформаційних конструкцій причепів АТЗ була здійснена шляхом генерування структурних рішень із залученням вдосконаленого методу синтезу [13-15]. Основою цього підходу є морфологічний аналіз, який імплементує алгоритм експертного оцінювання та ієрархічної декомпозиції конструктивних елементів. Зазначена декомпозиція передбачає групування елементів та їхніх ознак у підгрупи згідно з критерієм відносної важливості (пріоритетності) для досягнення цільових експлуатаційних параметрів.

За результатами експертного оцінювання впливу низки факторів на конструкції причепів АТЗ було ідентифіковано ключові морфологічні ознаки конструктивних елементів цих механізмів та встановлено їхні функціональні взаємозв'язки. Цей аналіз уможливив побудову морфологічної таблиці ознак конструктивних елементів трансформаційних конструкцій причепів АТЗ (табл. 1) та, відповідно, формування структурної моделі механічної системи «Трансформаційні конструкції причепів автотранспортних засобів» (рис. 1). Шляхом експертного аналізу, проведеного в рамках структурно-схемного синтезу трансформаційних конструкцій причепів АТЗ, були визначені наступні основні морфологічні ознаки його конструктивних елементів:

- бічний борт: конструкція; розміщення бортових листів; товщина листа; наявність технологічних отворів для зменшення напруження при розвантаженні; геометрична форма бортового листа; косинці в основі; компоновка на борті ребер жорсткості і їх геометрична конфігурація;
- конструкція заднього борта;
- дно причепа: конструкція; кріплення до осі; форма ребер жорсткості та їх компонування; тип з'єднання; основа осі для підвищення жорсткості;
- верхня частина причепа: наявність і тип та профіль поперечин;
- спосіб з'єднання елементів: нерухоме і рухоме.

Таблиця 1 - Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів трансформаційних причепів

Бічний борт								
Конструкція		3. Розміщення бортових листів	4. Товщина листа	5. Технічні отвори	6. Геометрична форма бортового листа	7. Косинці в основі	Ребра жорсткості	
1. Форма	2. Тип						8. Компонівка на борті	9. Геометрична конфігурація
1.1. Прямокутна. 1.2. Нахилена. 1.3. Бочкоподібна. 1.4. Комбінована.	2.1. Суцільний. 2.2. Секційний автономний. 2.3. Секційний з розсуванням. 2.4. Секційний з провентильованим. 2.5. Секційний з вийманням.	3.1. Суцільний лист. 3.2. Торцеве з боковим з'єднанням. 3.3. Торцеве із з'єднанням через ребро жорсткості.	4.1. 1,2 мм. 4.2. 1,5 мм. 4.3. 2 мм. 4.4. 3 мм. 4.5. 4 мм. 4.6. 5 мм.	5.1. Присутні. 5.2. Відсутні.	6.1. Прямий. 6.2. Трапецеїдальний з гострими кутами. 6.3. Прямий із трапецеїдальним з гострими кутами. 6.4. Трикутний. 6.5. Трикутний із прямим. 6.6. Прямий із трапецеїдальним. 6.7. Дугоподібний. 6.8. Дугоподібний із поперечною профільною трубою.	7.1. Присутні. 7.2. Відсутні. 7.3. 3 ребра жорсткості.	8.1. Розміщені вертикально. 8.2. Розміщені під нахилом. 8.3. Перехресне розташування. 8.4. Пересікання із поперечним ребром. 8.5. Розміщені вертикально із нахиленими поперечинами. 8.6. Розміщені вертикально із несиметричним нахиленням поперечин в різних напрямках. 8.7. З горизонтальним і вертикальним перехресним розташуванням. 8.8. З горизонтальним та нахиленим перехресним розташуванням. 8.9. З горизонтальним та несиметричним нахиленням поперечин в різних напрямках. 8.10. Розміщені горизонтально.	9.1. Квадрат. 9.2. Гнучий профіль з рівними сторонами. 9.3. Швелер. 9.4. Гнучий профіль із округло вигнутою стороною. 9.5. Гнучий профіль із округло вигнутою стороною. 9.6. Профільна труба. 9.7. Кутник рівносторонній із тупим кутом. 9.8. М-подібний профіль.
10. Конструкція заднього борта		Днище причепа						
		11. Конструкція	12. Кріплення до осі	13. Форма ребер жорсткості	14. Тип з'єднання	15. Компонування ребер жорсткості		16. Основа осідля підвищення жорсткості
10.1. Суцільна. 10.2. Секційна. 10.3. З дозаторними вікнами		11.1. Суцільна. 11.2. Секційна.	12.1. Укріпленою. 12.2. Додатково укріплено швелерами.	13.1. Квадратна труба. 13.2. Профільна труба. 13.3. Прямокутна труба. 13.4. Швелер.	14.1. Спикове. 14.2. Таврове.	15.1. Два повздовжні із поперечинами. 15.2. Три повздовжні із поперечинами. 15.3. Чотири повздовжні із поперечинами. 15.4. Поперечини з двома суцільними та проміжними повздовжніми.		16.1. Профільні вставки. 16.2. Профільна труба. 16.3. Швелер. 16.4. Плита.
Верхня частина причепа						Спосіб з'єднання елементів		
17. Наявність і тип			18. Профіль поперечин			19. Нерухоме		20. Рухоме
17.1. Відсутня. 17.2. Стационарна. 17.3. Знімна.			18.1. Круглий. 18.2. Прямокутний. 18.3. Квадратний. 18.4. Комбінований.			19.1. Зварне. 19.2. Клепаня. 19.3. Різьбове. 19.4. Паяне.		20.1. Шарнірне. 20.2. Замкове. 20.3. Розсувне з обмеженнями

Джерело: розроблено авторами

Загальна кількість генерованих варіантів трансформаційних конструкцій причепів, отриманих методом морфологічного аналізу з експертними оцінками та ієрархічною розбивкою за важливістю ознак елементів [6] є досить високою. Проте

визначальний вплив на ці конструктивні рішення мають конструкція бічного борту (ознака 2 з табл. 1) та конструкція дна причепа (ознака 11 з табл. 1). Вони якраз і визначають усю гамму згенерованих альтернатив (рис. 2 і рис. 3). Зокрема на рисунку 2 зображені конструкції згенерованих варіантів трансформаційних причепів з функціями розсування і провертання бічних бортів і днища, а також розсування днища і вставляння й виймання автономних секцій, на рисунку 3 з лише з функціями розсування і провертання бічних бортів і днища.

Відтак, при творенні альтернатив доцільно враховуватимемо лише ознаки конструктивних елементів віднесені до першого ієрархічного рівня, а ознаки віднесені до другого та третього ієрархічних рівнів мають лише забезпечуючі функції, що служать для ефективного функціонування даних механічних систем і на даному етапі генерування далі не будуть враховуватись.

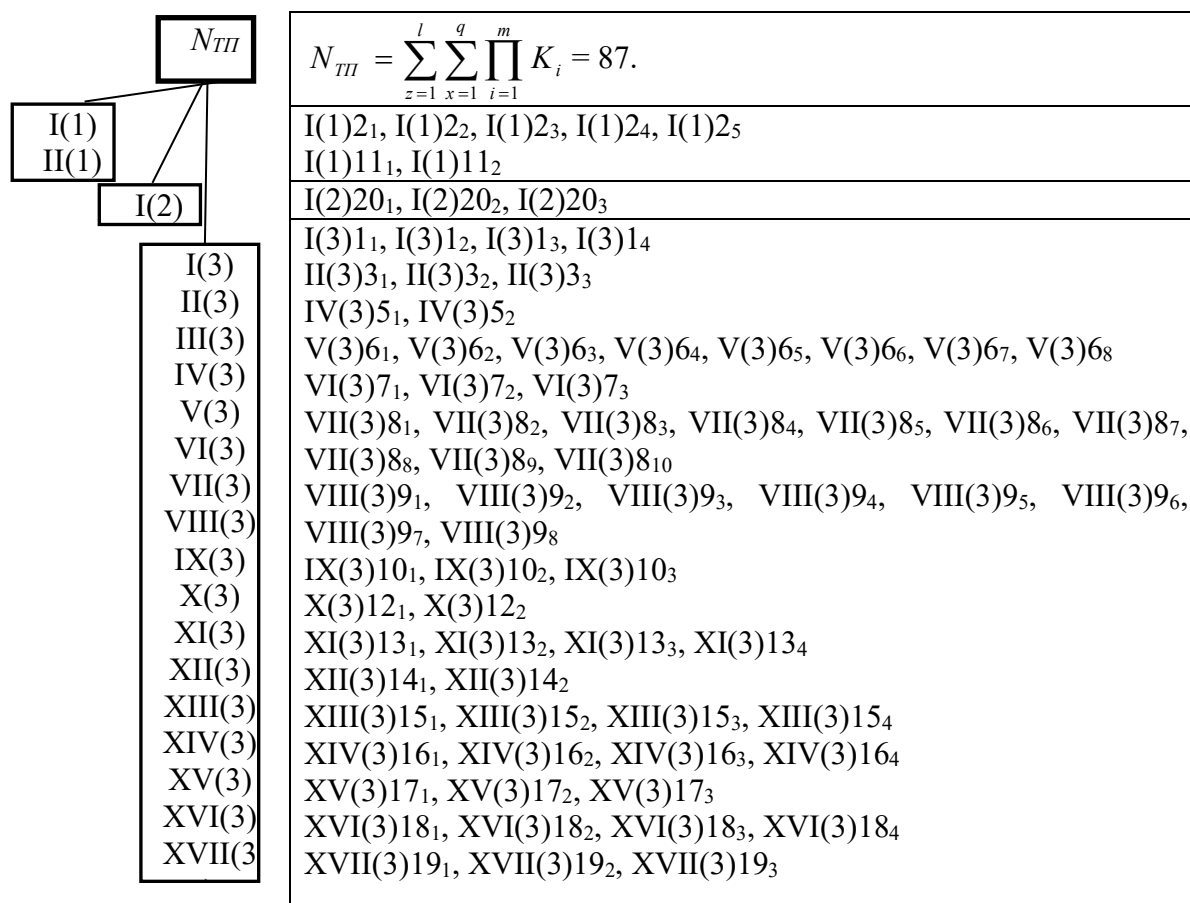


Рисунок 1 - Модель механічної системи «Трансформаційний причеп»: I - XVII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Джерело: розроблено авторами

Експлуатація вантажних транспортних засобів, обладнаних трансформаційними причепами, зображеними на рис. 3, здійснюється у двох основних режимах:

1. Використання причепів у складеному (компактному) положенні (рис. 4.а, і рис. 4.в) відбувається за таких умов: зберігання транспортного засобу; відсутність потреби у використанні максимального корисного об'єму при транспортуванні вантажів; необхідність забезпечення підвищеного розподілу осьового навантаження.

2. Використання причепів у розкладеному вигляді (рис. 4.б і рис. 4.г) відбувається шляхом їх розсування та розкладання з метою забезпечення їх максимального корисного об'єму (місткості) для перевезення вантажів (за умови їх низької густини).

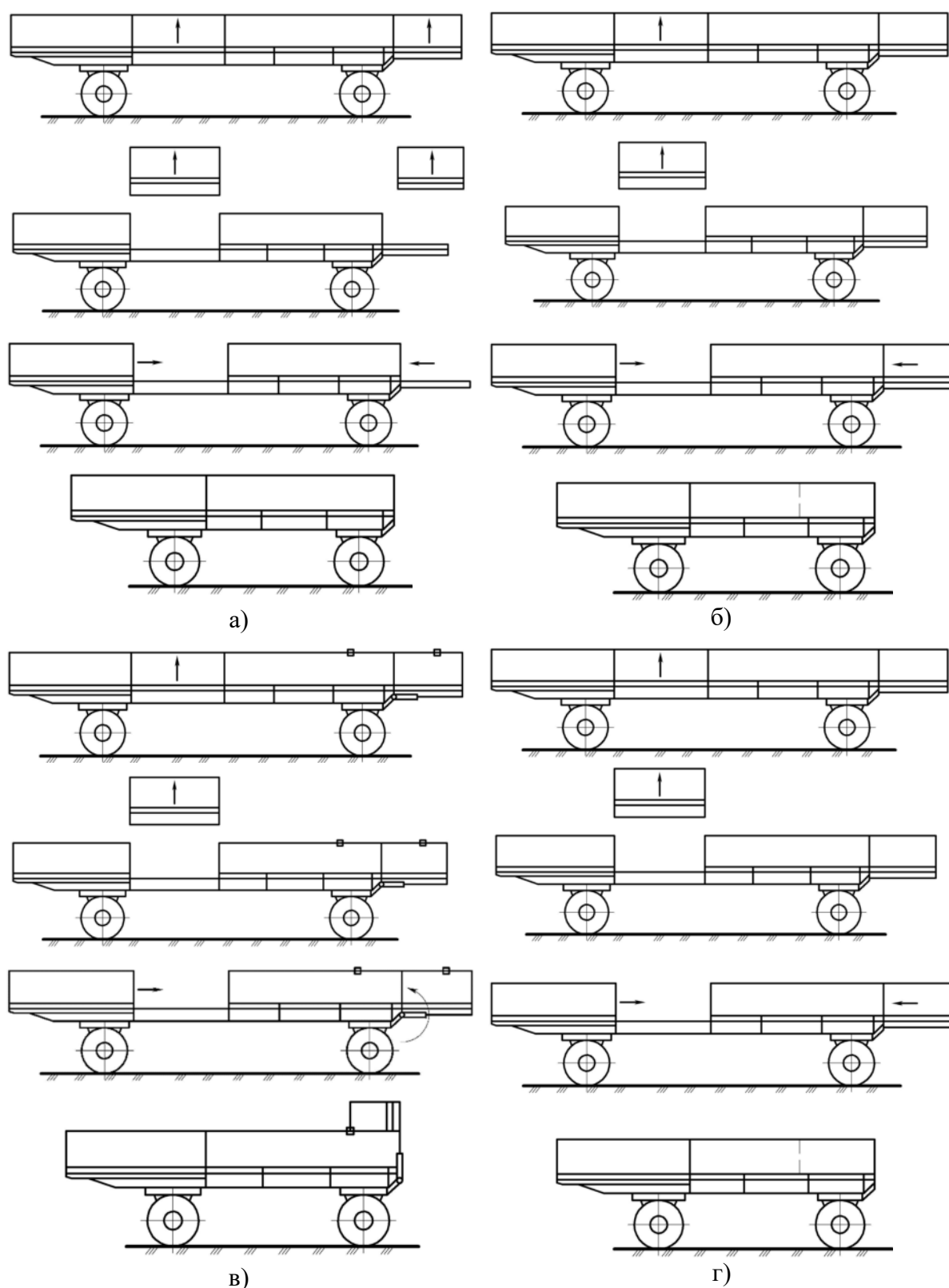


Рисунок 2 - Конструкції згенерованих варіантів трансформаційних причепів з:
а) розсуванням днища і вийманням автономних секцій; б) повертанням бічних бортів і днища, розсуванням днища й вийманням автономних секцій; в) розсуванням днища, повертанням бічних бортів і днища, й вийманням автономної секції; г) розсуванням бічних бортів і днища, й вийманням автономної секції

Джерело: розроблено авторами

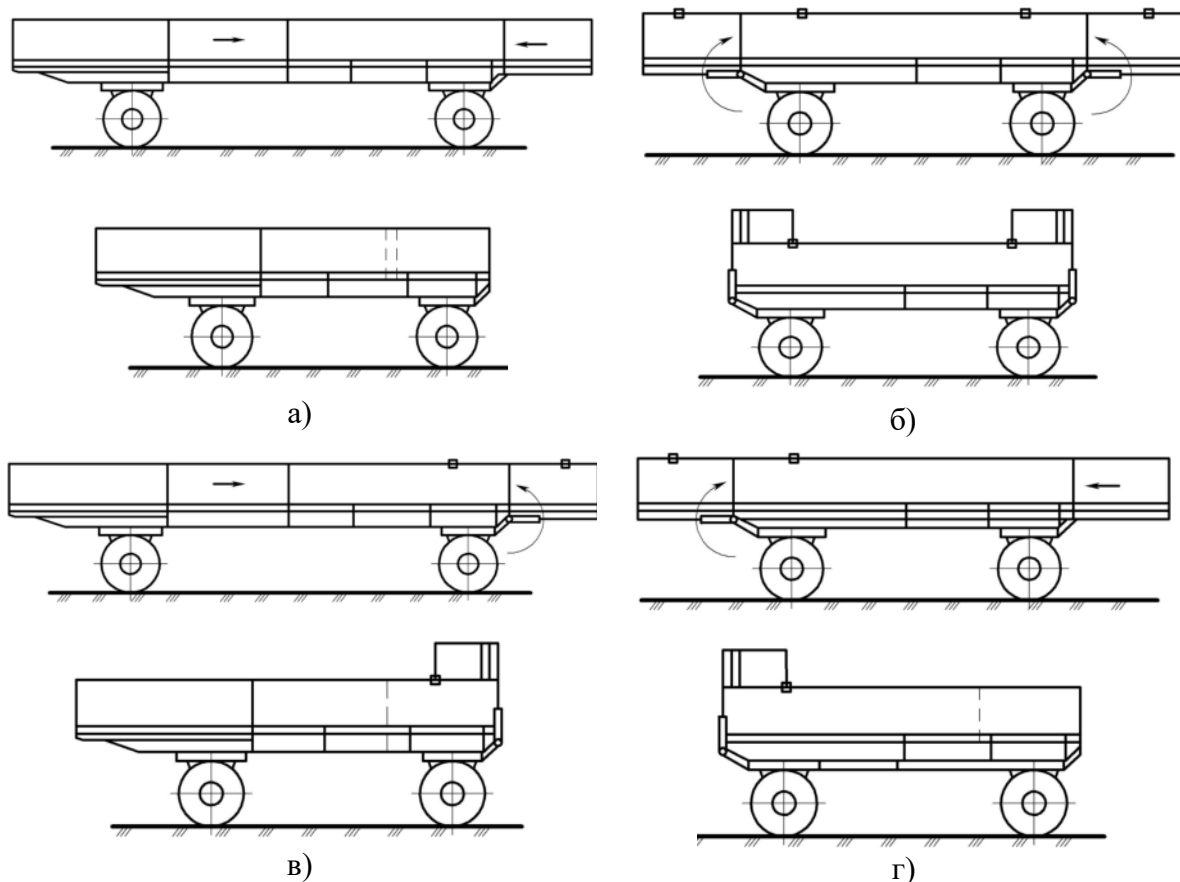


Рисунок 3 - Конструкції згенерованих варіантів трансформаційних причепів з функціями розсування та повертання: а) розсуванням бічних бортів і днища; б) повертанням бічних бортів і днища; в), г) розсуванням та повертанням бічних бортів і днища

Джерело: розроблено авторами

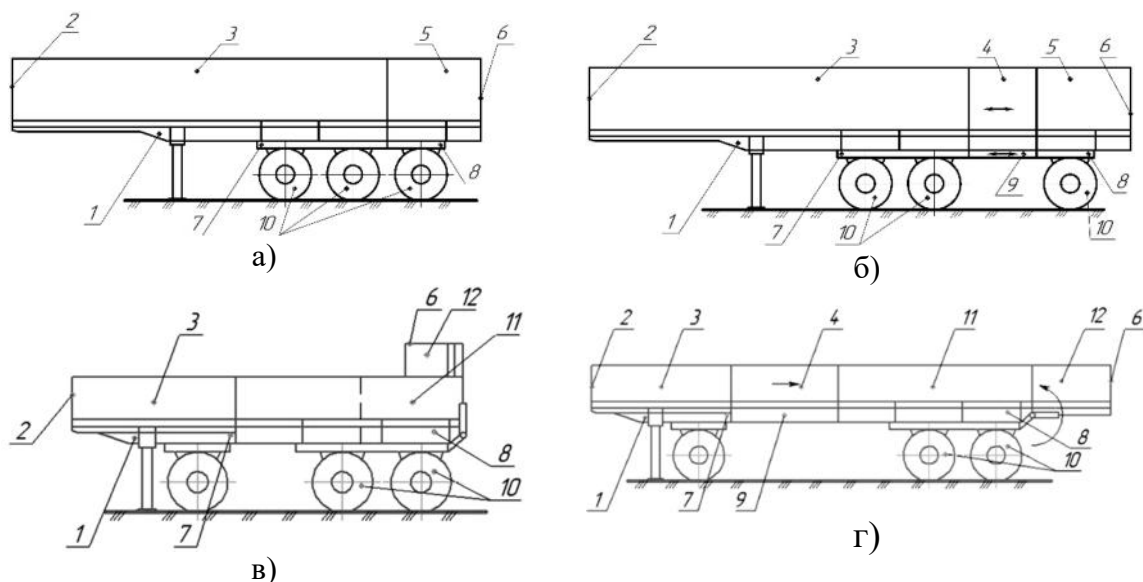


Рисунок 4 - Конструкції розроблених трансформаційних причепів: а), б) з функцією розсування; в), г) із функціями розсування та розкладання; 1 - днище; 2 - передній борт; 3 - фіксована передня частина бічних бортів; 4 - розсувна середня частина бічних бортів; 5 - фіксована задня частина бічних бортів; 6 - задній борт; 7 - передня частина рами; 8 - задня частина рами; 9 - розсувна частина рами; 10 - колісна база; 11 - фіксована середня частина бічних бортів; 12 - відкидна задня частина бічних бортів

Джерело: розроблено авторами

При цьому процедура їх трансформації передбачає розсування або розкладання причепа за рахунок або аксіального зміщення (шляхом осевого зміщення середньої розсувної частини бічних бортів), або шляхом повертання відкидної задньої частини бічних бортів із приведенням її у горизонтальне положення відносно фіксованої середньої частини бічних бортів.

Висновок. Проведено структурно-схемний синтез трансформаційних причепів. В результаті застосування морфологічного аналізу при генерації альтернатив побудовано морфологічну таблицю окремих ознак конструктивних елементів цих систем і модель механічної системи «Трансформаційний причеп». Проведений експертний аналіз трансформаційних причепів дозволив обрати наступні морфологічні ознаки конструктивних елементів: бічний борт (конструкція; розміщення бортових листів; товщина листа; наявність технологічних отворів для зменшення напруження при розвантаженні; геометрична форма бортового листа; косинці в основі; компоновка на борті ребер жорсткості і їх геометрична конфігурація); (конструкція заднього борта); дно причепа: конструкція; кріплення до осі; форма ребер жорсткості та їх компонування; тип з'єднання; основа осі для підвищення жорсткості; верхня частина причепа: наявність і тип та профіль поперечин; спосіб з'єднання елементів: нерухоме і рухоме. Це дозволило отримати певну кількість альтернатив трансформаційних причепів з різними конструктивними ознаками, і, зокрема, з функціями розсування, повертання та виймання, що може створити значні технологічні можливості для мінімізації площ при зберіганні автотранспортних засобів в автотранспортних підприємствах, ефективності збільшення корисного об'єму для акумулювання та транспортування низько- та середньощільних вантажів та забезпеченні нормованого осевого розподілу навантаження при транспортуванні вантажів високої питомої густини з метою дотримання технічних регламентів та підвищення безпеки.

Список літератури

1. Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків М. Я., Капський Д. В. Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричепа вантажного автомобіля. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал*. 2021. № 1(24). С. 93–103.
2. *Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП: навчальний посібник* / Гевко І. Б. та ін. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. 276 с.
3. *Основи технології виробництва та ремонту автомобілів: навчальний посібник* / Гевко І. Б. та ін. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. 544 с.
4. Liashuk O., Hevko I., Hud V., Khoroshun R., Hevko B., Matviishyn A., Sipravska M. Stands for car suspension research. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*. № 26 (2022). С. 93–103.
5. Lyashuk O., Levkovych M., Vovk Y., Gevko I., Stashkiv M., Slobodian L., Pyndus Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. № 118. С. 161–172. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>.
6. Sokil B., Lyashuk O., Sokil M., Vovk Y., Lebid I., Hevko I., Levkovych M., Khoroshun R., Matviishyn. Methodology of force parameters justification of the controlled steering wheel suspension A. *COMMUNICATIONS*. 2022. Vol. 24, № 3. С. 247–258.
7. Lyashuk O., Aulin V., Rohatynskyi R., Gevko I., Hupka A., Mironov D., Martyniuk V., Lutsyk A., Denysiuk N. Mathematical modelling of hybrid powertrain systems for improved energy efficiency. *COMMUNICATIONS*. 2025. Vol. 27, № 2. С. 36–52.
8. Rohatynskyi R., Gevko I., Lyashuk O., Aulin V., Tson O., Nikerui Y., Horkunenko A., Serilko L., Gevko B., Mosiy O. Substantiation of parameters of cargo movement by car rope systems. *COMMUNICATIONS*. 2024. Vol. 26, № 4. С. 225–236.
9. Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Хорошун Р. В., Романюк О. Б. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. *Науковий вісник ХДМА: науковий журнал*. 2021. № 2(25). С. 72–81.
10. Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Хорошун Р. В., Шевчук В. В. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. *Вісник ЛДУБЖД*. 2023. № 28. С. 115–122.
11. Ляшук О. Л., Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Хорошун Р. В., Кашканова Г. Г., Антонюк О. П. Модель проходження повороту автомобілем. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. Вип. 2(18). С. 87–93.
12. Міронов Д. В., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Гупка А. Б., Слободян Л. М., Гевко Б. Р., Хорошун Р. В. Розробка моделі узагальненого діагностичного показника технічного стану ходової частини автомобіля з використанням математичних методів теорії планування експерименту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. № 2(21). С. 135–144.
13. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Левкович М. Г., Клендій В. М., Гупка В. В. Структурний синтез гальмівних систем з техніко-економічним обґрунтуванням. *Наукові нотатки*. Луцьк, 2021. Вип. 71. С. 228–233.

14. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Левкович М. Г., Тесля В. О. Структурний синтез кузова напівпричепа вантажного автомобіля з техніко-економічним обґрунтуванням. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36) II. С. 25–33.
15. Гевко Ів. Б., Ляшук О. Л., Рогатинський Р. М., Матвіїшин А. Й., Хорошун Р. В. Синтез підвіски автотранспортних засобів. *Центральноукраїнський науковий вісник*. 2023. Вип. 8(39) I. С. 153–164.
16. Розсувний кузов вантажного транспортного засобу: пат. 155040 Україна, МПК B60P. № u202303606; опубл. 10.01.2024. Бюл. № 2/1024.

References

1. Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Levkovich, M. H., Vovk, Yu. Ya., Stashkiv, M. Ya., Kapskyi, D. V. (2021). Study of the stress-strain state of the bottom of a truck semi-trailer body. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1(24), 93–103 [in Ukrainian].
2. Hevko, I. B. et al. (2021). *Technical and Economic Justification of Engineering Solutions at Service Stations and Motor Transport Enterprises: Study Guide*. Ternopil: Vydavnytstvo TNTU im. I. Puliiua [in Ukrainian].
3. Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv: navchalnyi posibnyk / Hevko I. B. et al. Ternopil: Vydvo TNTU im. I. Puliiua, 2021. 544 p [in Ukrainian].
4. Liashuk, O., Hevko, I., Hud, V., Khoroshun, R., Hevko, B., Matviishyn, A., Sipravska, M. (2022). Stands for car suspension research. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, 26, 93–103.
5. Lyashuk, O., Levkovich, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. (2023). The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 118, 161–172. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>
6. Sokil, B., Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Lebid, I., Hevko, I., Levkovich, M., Khoroshun, R., Matviishyn, A. (2022). Methodology of force parameters justification of the controlled steering wheel suspension. *COMMUNICATIONS*, 24(3), 247–258.
7. Lyashuk, O., Aulin, V., Rohatynskiy, R., Gevko, I., Hupka, A., Mironov, D., Martyniuk, V., Lutsyk, A., Denysiuk, N. (2025). Mathematical modelling of hybrid powertrain systems for improved energy efficiency. *COMMUNICATIONS*, 27(2), 36–52.
8. Rohatynskiy, R., Gevko, I., Lyashuk, O., Aulin, V., Tson, O., Nikerui, Y., Horkunenko, A., Serilko, L., Gevko, B., Mosiy, O. (2024). Substantiation of parameters of cargo movement by vehicle rope systems. *COMMUNICATIONS*, 26(4), 225–236.
9. Rohatynskiy, R. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Khoroshun, R. V., Romaniuk, O. B. (2021). Vehicle motion model on a curved track. *Naukovyi visnyk KhDMA*, 2(25), 72–81 [in Ukrainian].
10. Rohatynskiy, R. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Khoroshun, R. V., Shevchuk, V. V. (2023). Vehicle motion model on a curved track. *Visnyk LDUBZhd*, 28, 115–122 [in Ukrainian].
11. Liashuk, O. L., Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Khoroshun, R. V., Kashkanova, H. H., Antoniuk, O. P. (2023). Vehicle cornering model. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 2(18), 87–93 [in Ukrainian].
12. Mironov, D. V., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Hupka, A. B., Slobodian, L. M., Hevko, B. R., Khoroshun, R. V. (2023). Development of a generalized diagnostic indicator model for vehicle chassis condition using mathematical experiment planning. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(21), 135–144 [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Rohatynskiy, R. M., Levkovich, M. H., Klendii, V. M., Hupka, V. V. (2021). Structural synthesis of braking systems with technical and economic justification. *Naukovi notatky (Lutsk)*, 71, 228–233 [in Ukrainian].
14. Hevko, I. B., Rohatynskiy, R. M., Liashuk, O. L., Levkovich, M. H., Teslia, V. O. (2022). Structural synthesis of semi-trailer truck body with technico-economic justification. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 5(36) II, 25–33 [in Ukrainian].
15. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Rohatynskiy, R. M., Matviishyn, A. Y., Khoroshun, R. V. (2023). Vehicle suspension synthesis. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk*, 8(39) I, 153–164 [in Ukrainian].
16. Sliding truck body: patent 155040 Ukraine, IPC B60P. № u202303606; publ. 10.01.2024. Bul. 2/1024.

Ivan Hevko¹, DSc., Prof., **Oleg Lyashuk**¹, DSc., Prof., **Taras Dovbush**¹, Assoc. Prof., PhD,

Igor Hevko¹, Assoc. Prof., PhD, **Roman Khoroshun**¹, Assoc. Prof., PhD, **Igor Hevko**², PhD

¹Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

²Berezhany Professional College of the NULR&EM of Ukraine, Berezhany, Ukraine

Design of Transformation Trailers to Optimize Storage Space in Trucking Companies

The research is devoted to the design of transformation trailers for optimizing storage areas in motor transport enterprises. The study was conducted to find new designs of transformation trailers for motor vehicles that optimize their operational characteristics in accordance with current production and economic requirements, and their further calculation. Based on the generated alternatives, designs of transformation trailers were developed, which use the functionality of extension, rotation, and removal. As a result of the research, the design of a trailer for which a patent for a utility model of Ukraine with a sliding function was obtained, as well as a trailer with sliding and turning functions, for the design of which an application for a patent for a utility model of Ukraine was filed.

design, synthesis, alternative, section, side, bottom, trailer, vehicle

Одержано (Received) 22.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 12.12.2025

УДК 656.338.12

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.244-250](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.244-250)**М. В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **І. В. Шепеленко**, проф., д-р техн. наук,**Ю. В. Кулешков**, проф., д-р техн. наук, **Р. А. Осін**, доц, канд. техн. наук,**Т. В. Руденко**, доц. канд. техн. наук, **В. П. Петленко***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: krasotamv@ukr.net*

Підвищення ефективності обслуговування та ремонту автомобілів використанням інформаційних технологій

Актуальність проведених досліджень зумовлена тим, що основним завданням удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту автомобілів є планування видів робіт та контроль їх ефективності з використанням інформаційних технологій. Аналіз порядку та змісту робіт при поточній діяльності інженерно-технічних служб підприємств технічного сервісу дозволив виділити інформацію для введення вихідних даних, сформувати алгоритм обробки та отримати необхідні дані для поточного та стратегічного планування. Надано пропозиції з організації інформаційної системи управління на підприємстві при виконанні технічних обслуговувань та ремонтів автомобілів. Запропоновано створювати власні бази даних по обслуговуваних автомобілях, що мають включати інформацію по автомобілям, а також фіксацію норм часу при проведенні технологічних операцій обслуговування та ремонту. Використання інформаційної системи з управління та планування діяльності на підприємствах технічного сервісу транспортних та технологічних машин дозволить підвищити продуктивність та якість виконання робіт, посилить контроль за діяльністю персоналу, а також використанням рухомого складу. **автомобіль, транспорт, інформаційні технології, технічний сервіс, ремонт**

Постановка проблеми. За останні роки автопарк автомобілів по всій території України значно збільшив свій рухомий склад, тим самим створивши передумови для відкриття нових автосервісних підприємств та збільшення в них загального потоку нових клієнтів. Але на більшості підприємств, що надають послуги з обслуговування автомобілів, існує загальна низка проблем як з боку реалізації технологічних процесів на підприємствах, так і при організації функціонування самих підприємств.

У сучасних умовах ринку автосервісних послуг розробка та впровадження інновацій стає необхідним для вирішення багатьох проблем. Одним із напрямів підвищення ефективності автотранспортних та сервісних підприємств є впровадження у виробничий процес інформаційних технологій.

На даний момент на ринку автосервісних послуг як на території України, так і в інших країнах багато підприємств застосовують окремі інформаційні технології. Все це говорить про те, що інформаційні технології дійсно мають величезний попит практично у всіх сферах діяльності, у тому числі й у сфері надання автосервісних послуг.

Вирішення завдання підвищення ефективності сервісу автомобілів передбачає впровадження в систему підприємств нових інформаційних технологій, метою яких є автоматизація системи процесів функціонування виробництва за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, а також логістичних ланцюжків дій усередині підприємства, швидкості обслуговування клієнтів.

З розвитком інформаційного суспільства та загальним загостренням конкуренції завдання управління підприємством вимагають застосування інформаційних та телекомунікаційних технологій, оскільки потреба в інформації та засобах її обробки

постійно збільшується, як і самі обсяги даних: виробничі, економічні, нормативні, а також дані, що відображають думку споживачів. Вже зараз деякі підприємства підвищують рівень довіри споживачів, за допомогою інформаційних технологій роблять послугу прозорою - пропонують клієнтам інформаційне табло графіка ремонту автомобіля, електронну книгу скарг, спостереження за процесом ремонту в майстерні через монітор та ін. [2].

Технічна готовність автомобіля визначається його справністю, надійністю, наявністю підготовленого водія, укомплектованістю запасними частинами, інструментом, пристроями, заправкою паливом, мастильними та іншими експлуатаційними матеріалами. Вона досягається: суворим дотриманням вимог та правил експлуатації автомобілів, встановлених нормативно-технічною документацією; своєчасним і якісним ремонтом і пошкоджених автомобілів, що вийшли з ладу; своєчасним та повним забезпеченням підприємств з ремонту та експлуатації запасними частинами та раціональним їх використанням; створенням дільниць технічного обслуговування та ремонту, що забезпечують виконання всіх вимог щодо технічного обслуговування та ремонту автомобілів; підтримкою обладнання для ремонту та технічного обслуговування у постійній готовності до виконання покладених завдань; високим рівнем технічної підготовки водіїв та інших спеціалістів автомобільної служби [1].

Існуючі методики планування та організації роботи технічних засобів на підприємствах автомобільного транспорту були розроблені в економічних умовах, що істотно відрізняються від сучасних. Вони не дозволяють отримувати результати в режимі оперативного планування та контролю діяльності інженерно-технічної служби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Істотний внесок у вирішення проблеми підвищення ефективності технічного обслуговування та ремонту транспортних засобів зробили багато авторів [1-4].

Внесок системи технічного обслуговування автомобілів у підвищення ефективності їх технічної експлуатації досить значний. При раціональному проведенні технологічних процесів скорочується час на технічне обслуговування та ремонти, збільшується напрацювання автомобіля і підвищується його продуктивність [2, 3, 4].

Технічне обслуговування (ТО) автомобілів займає великий обсяг часу та праці у загальному часі експлуатації автомобіля. Структура трудових витрат за весь час експлуатації вантажних автомобілів складає: 1,5% - виготовлення; 45,5% - ТО; 45% - поточний ремонт; 8% - капітальний ремонт [5]. В умовах України водії значну частину свого робочого часу зайняті проведенням ТО та ремонтів машин [3]. Тому, сфера технічного обслуговування автомобілів, як складова частина технічного сервісу, сьогодні одна з найефективніших галузей автомобільного транспорту.

В даний час забезпеченість галузі ремонтно-обслуговуючою базою становить близько 60%, тоді як вимоги до неї зростають у зв'язку з підвищенням конструктивної складності машин у результаті інтенсивних технологій у виробництві [6].

На недостатній рівень якості технічного обслуговування на сервісних підприємствах складає 8%, низький рівень компетенції працівників сервісу близько 6%, значний час очікування обслуговування 8,3 %, а на високу трудомісткість оформлення документів вказали близько 6% клієнтів [7].

За даними [6] основними показниками, що відображають вплив обслуговуючих робітників на ефективність технічної експлуатації автомобілів, є показники експлуатаційної надійності, економічності та інші, такі як напрацювання на відмову або несправність, тривалість простою в обслуговуванні, витрата запчастин, витрата палива, напрацювання до чергового ТО та ремонту та ін.

За попередньою оцінкою сукупного впливу обслуговуючих робітників на рівень технічної готовності та витрат на технічне обслуговування вантажних автомобілів на частку водіїв припадає приблизно від 33 до 36 %, а на частку обслуговуючих робітників від 64 до 67 % [7].

За інформацією [7] впровадження достовірної діагностики дозволяє значно, в рази збільшити фактичне міжремонтне напрацювання та зменшити кількість відмов у 2-2,5 рази, зменшити витрату палива на 5-8%.

На тепершній час у нашій країні та за кордоном проводяться науково-дослідні роботи з удосконалення методів та технологій ТО на основі автоматизованого контролю технічного стану машин. Намітився перспективний напрямок, досліджень, до якого належать методи та створені на їх основі технології діагностування транспортних засобів за параметрами характеристик швидкоплинних процесів, що мають місце при роботі двигунів машин у перехідних, тестових режимах вільного розгону та вибігу. Визначено пріоритетні напрями досліджень з метою вибору найбільш інформативних динамічних характеристик [8, 9].

Однак, у приведених вище роботах не вирішується завдання планування та управління технічним обслуговуванням та ремонтом автомобілів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є підвищення ефективності технологічних процесів обслуговування та ремонту автомобілів використанням інформаційних технологій на автосервісних і автотранспортних підприємствах.

Викладення основного матеріалу. Поряд з оснащенням автомобільного транспорту технічно досконалим парком рухомого складу до найважливішої групи факторів зростання продуктивності праці на автомобільному транспорті та підвищення його технічного рівня належать: організація планування сервісних та ремонтних робіт; впровадження нових видів технологічного обладнання; удосконалення технології технічного обслуговування та ремонту автомобілів; робота з персоналом (співробітниками) у вигляді обліку робочого персоналу, контролю заробітної плати, навчання та професійного зростання; контроль та облік систем (складських, бухгалтерських, запасів запчастин, витратних матеріалів тощо); автоматизація процесів шляхом застосування спеціалізованого програмного забезпечення та онлайн-сервісів.

Причинами низької ефективності існуючої системи планування технічного обслуговування та ремонту можна вважати: відсутність згрупованих та взаємопов'язаних елементів вхідної інформації про конкретний автомобіль та її змістової частини; відсутність контролю за виконанням операцій технологічного процесу обслуговування та ремонту автомобілів; відсутність адаптивної структури, що відповідає вимогам автоматизованої обробки даних та управління виконанням робіт.

Автомобілі з кожним роком стають дедалі складнішими в обслуговуванні та ремонті. Саме тому, важливим чинником підвищення ефективності їх обслуговування є створення баз даних, що постійно оновлюються та містять інформацію з технічного обслуговування, ремонтів та технічного нормування операцій. Завдяки таким базам з'являються нові можливості щодо планування всіх видів сервісних робіт, розподілу персоналу для їх виконання та оптимального завантаження обладнання, що використовується.

У зв'язку з цим розробка методики ведення документації з технічного обслуговування та ремонту автомобілів є важливим та перспективним напрямом підвищення якості обслуговування та експлуатації автомобілів.

Виходячи з вищесказаного виникає необхідність у розробці та впровадженні на підприємствах інформаційної системи для ведення плануючої документації з технічного обслуговування та ремонту автомобілів, що обслуговуються на підприємствах, яка дозволить підвищити ефективність виконуваних робіт. Структурна схема роботи інформаційної системи з планування та управління видами робіт наведена на рис. 1.

Пропонується виконувати облік та планування технічних обслуговувань створивши відповідну базу даних на підприємстві. Вихідними даними для створення облікового запису автомобіля є наступні: перелік та технічний стан автомобілів; нормативні та фактичні напрацювання до капітального ремонту (строки служби) машин; норми витрати моторесурсів або пробігів до проведення технічного обслуговування; потреба в використанні автомобілів або запланованих моторесурсах на

майбутній рік; потреба у технічному обслуговуванні та ремонтах машин машин до початку запланованого року; виробничі можливості підрозділів технічного обслуговування та ремонту машин [2].

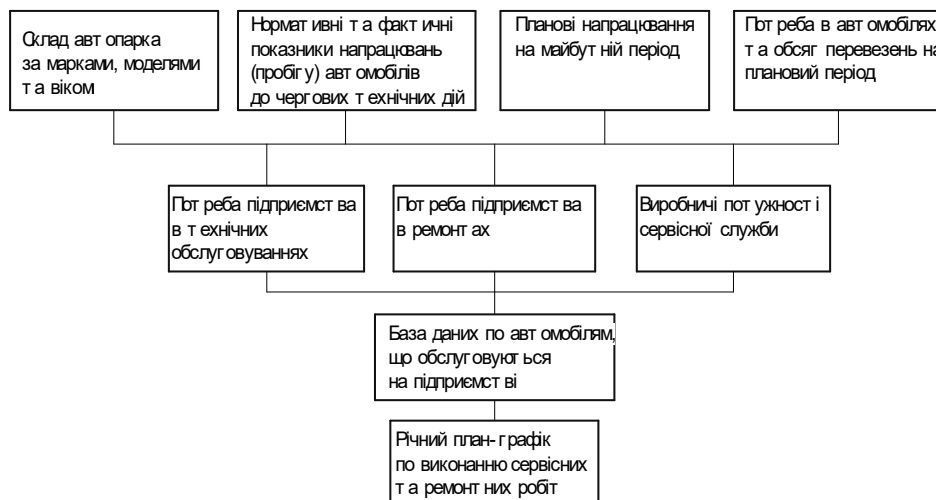


Рисунок 1 - Схема впровадження інформаційної системи планування технічних обслуговувань та ремонту автомобілів на підприємстві

Джерело: розроблено авторами

Перелік автомобільної техніки із зазначенням норм напрацювання до ремонту та списання, що використовується при розрахунку програми технічних обслуговувань та ремонтів створюється плановим відділом підприємства.

Значення коефіцієнтів коригування (норм напрацювання та інш.) вибираються з загальнодоступних даних [1, 2]. При плануванні обслуговувань повинна реалізовуватися можливість коригування розрахунків за фактичними даними, правильності заповнення форм, вибору машин з рухомого складу, що є в парку, а також внесення інших структурних елементів, що розширюють застосування баз даних.

Після заповнення бази даних по обслуговуваних автомобілях проводиться розрахунок річного плану видів технічних впливів, розрахунок трудомісткості виконуваних робіт та потреби у ресурсах (трудовах, матеріальних). На основі розробленої програми обслуговувань та ремонтів з'являється можливість планування номенклатури та кількості запасних частин, матеріалів, утворення відходів у процесі технічного сервісу та вирішення інших завдань.

Результатом використання бази даних автомобілів є формування плану-графіка виконання видів робіт, що дозволить проводити планування завантаження виробничих ділянок, розраховувати потребу у запасних частинах та матеріалах.

Технічне обслуговування рухомого складу за періодичністю, переліком та трудомісткістю виконуваних робіт поділяється на: щоденне технічне обслуговування (ЩО); перше технічне обслуговування (ТО-1); друге технічне обслуговування (ТО-2); сезонне технічне обслуговування (СО) [1, 2]. Виконання технічного обслуговування та ремонту рухомого складу в автотранспортних підприємствах здійснюється за схемою, наведеною на рис. 2.

Обслуговування автомобілів за кожним видом ТО здійснюється за певним регламентом операцій, що складається в автотранспортному підприємстві з урахуванням рекомендацій підприємства виробника автомобіля та типу рухомого складу, що використовується, та умов його експлуатації.

При плануванні технічних дій з обслуговування та ремонту рухомого складу необхідно знати трудомісткість виконання операцій. Для цього потрібні дані з норм

часу, що витрачатимуться на проведення технологічних операцій. Зважаючи на досить широку номенклатуру марок транспортних засобів, що експлуатуються на теперішній час в Україні, їх модельний склад та вікові групи використання існуючого програмного забезпечення та електронних баз даних не забезпечує в повній мірі процес нормування операцій.

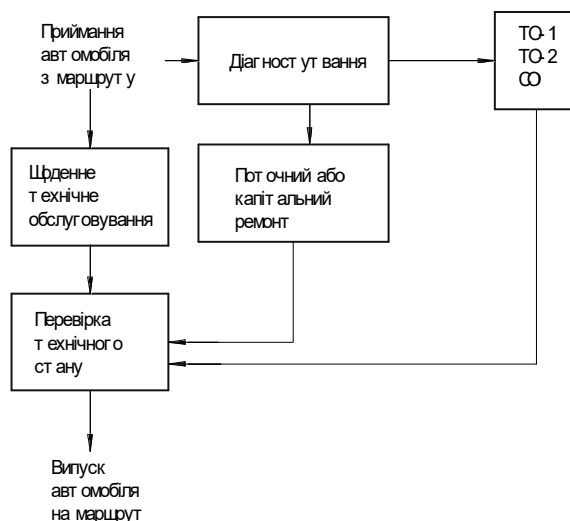


Рисунок 2 – Послідовність виконання технічних дій при обслуговуванні автомобілів

Джерело: розроблено авторами

Існуюче програмне забезпечення (наприклад BAS Управління автотранспортом, Autodata, TecDoc), насправді не містить на кожен конкретну модель машини і кожен конкретний вид робіт свої норми часу. Тому, щоб оперативно підібрати норми для конкретного випадку, необхідна власна автоматизована система управління базою даних норм часу технічного обслуговування та прогнозування трудомісткості.

Значну частку в собівартості робіт з експлуатації автомобілів становлять витрати на технічне обслуговування та ремонт. Визначення оптимальних норм часу для обслуговування та ремонту може призвести до зниження собівартості витрат. В даний час контроль норм часу на виконання обслуговування та ремонту автомобілів на підприємствах практично не проводиться.

Завдання нормування робіт на сервісних та автотранспортних підприємствах ускладнюється широкою номенклатурою автомобілів, різним їх віковим та марочним складом. Неможливо знайти універсальні бази норм часу, оскільки кожне підприємство має різне оснащення технологічним устаткуванням, кваліфікацію кадрів та інші виробничі можливості. У зв'язку з цим виникають труднощі із застосуванням наявного програмного забезпечення, яке містить інформацію щодо нормативів виконання основних видів робіт.

Пропонується застосування цифрового відеозапису процесу виконання технічних дій та комп'ютерних технологій обробки отриманої інформації з метою подальшого аналізу та оптимізації процесів технічного обслуговування та ремонту та своєчасно коригувати норми часу на конкретному автопідприємстві. Крім того, використання цифрового відеозапису при технічному обслуговуванні та ремонті дає можливість створення навчальних відеопрограм для підвищення кваліфікації персоналу та якості його праці, а також технологічного супроводу та дотримання певних норм часу.

Застосування власних баз даних на підприємстві при технічному обслуговуванні та ремонті транспортних засобів дозволить отримувати більш уточнені дані щодо призначення номенклатури робіт у порівнянні з існуючими нормативними документами, а також визначення ефективніших стратегій експлуатації транспортних засобів.

Застосування конкретної інформації по автомобілях, що обслуговуються на

автотранспортних та сервісних підприємствах забезпечить підвищення виробничо-господарської діяльності автотранспортних підприємств, збільшення обсягів транспортної роботи, інтенсифікацію використання рухомого складу, зниження собівартості та досягнення рентабельної роботи.

Створення таких баз є складною науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволяє: 1) обґрунтувати доцільність та ефективність автоматизації управління; 2) вибрати найбільш ефективні напрямки автоматизації; 3) встановити раціональну черговість реалізації заходів щодо автоматизації управління; 4) визначити раціональну структуру системи керування; 5) знайти оптимальний склад комплексу технічних засобів; 6) визначити вплив застосування інформації на техніко-економічні показники виробництва.

Таким чином, застосування баз даних в системі обслуговування та ремонту автомобілів у сучасних умовах є необхідністю при проведенні планово-запобіжної системи технічних обслуговувань та ремонтів.

У тенденції зміни підходу до всієї системи технічних обслуговувань та ремонтів рухомого складу автомобільного транспорту, що намітилася, відкриваються великі перспективи щодо проведення наукових досліджень з метою створення методик підвищення економічної ефективності та надійності, а також розробки рекомендацій підприємствам, що експлуатують автотранспорт.

Отже, інформаційні технології доцільно широко впроваджувати в галузі автомобільного транспорту, та їх розвиток сприятливо позначиться як на робочому процесі, так і на обслуговуванні техніки. Раціональне планування технічних дій з рухомого складу мінімізує кількість робочих операцій та забезпечить значне значне зниження трудомісткості.

Висновки. 1. Використання інформаційної системи з управління та планування діяльності на підприємствах технічного сервісу автомобілів дозволить підвищити продуктивність та якість виконання робіт; посилить контроль за діяльністю персоналу та використанням рухомого складу.

2. Запропоновані технології визначення норм часу на виконання операцій з технічних обслуговувань та ремонтів автотранспорту шляхом виконання відео фіксації виконуваних робіт дозволять застосовувати різні методи підвищення ефективності праці, розробляти рекомендації з оптимізації продуктивності праці, виявляти недоліки щодо застосування технологічних засобів, використовувати отримані дані при навчанні персоналу та покращувати умови праці на виробництві.

3. Методика відео фіксації проведення технологічних операцій технічних обслуговувань та ремонтів дозволить отримати коригувальні коефіцієнти для норм часу, що містяться в існуючих базах програмного забезпечення.

Список літератури

1. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / під заг. ред. д-ра техн. наук, проф. Ауліна В. В. – Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. – 370 с.
2. Форнальчик Є. Ю., Качмар Р. Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів. Львів: Львівська політехніка, 2017. 324 с.
3. Надич Т. М., Аулін В. В. Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. II.
4. Волков В. П., Гришук І. В., Волкова Т. В., Белов В. І., Волков Ю. В., Онищук В. П. Сучасні технології в технічній експлуатації автомобілів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. № 2. С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.85>.
5. Красота М. В., Кулешков Ю. В., Красота І. В., Осін Р. А., Руденко Т. В. Дослідження шляхів підвищення оперативності виконання діагностичних операцій електронних систем автотракторної техніки. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Vol. 9(40), Part I. С. 144–151. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.144-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.144-151).
6. Красота М. В., Шепеленко І. В., Кулешков Ю. В., Осін Р. А., Руденко Т. В. Стан і напрямки підвищення ефективності технічного сервісу вантажних автомобілів в агропромисловому комплексі.

- Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41), ч. II. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.161-168](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.161-168).
7. Хайменов О. О., Осін Р. А., Красота М. В., Кулешков Ю. В., Руденко Т. В. Дослідження шляхів підвищення ефективності технічних обслуговувань та ремонтів електронних систем автомобілів. *Збірник праць молодих науковців ЦНТУ*. Вип. 14. 2024.
 8. Adekunle A. A., Ikubanni P. P., Agboola O. O. An Expert System for Automobile Repairs and Maintenance. *Mindanao Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 16. C. 41–56.
 9. Andersson R., Manfredsson P., Lantz B. Total productive maintenance in support processes: an enabler for operation excellence. *Total Quality Management & Business Excellence*. 2015. Vol. 26(9–10). C. 1055.

References

1. Aulin V. V., Holub D. V., Hryn'kiv A. V., Lysenko S. V. Methodological and theoretical principles for ensuring and improving the reliability of automotive transport systems functioning: monograph / under the general editorship of Prof. Aulin V. V. Kropyvnytskyi: Vydavets "KOD", 2017. 370 p. [in Ukrainian].
2. Fornalchuk Ye. Yu., Kachmar R. Ya. Fundamentals of technical service of vehicles. Lviv: Lvivska Politehnika, 2017. 324 p. [in Ukrainian].
3. Nadych T. M., Aulin V. V. Methods and measures for improving the technical service system of trucks based on a cyber-physical approach and development of scientific and technical documentation of its operations. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 2025. Issue 11(42), Part II. [in Ukrainian].
4. Volkov V. P., Hrytsuk I. V., Volkova T. V., Belov V. I., Volkov Yu. V., Onyshchuk V. P. Modern technologies in automotive technical operation. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*. 2019. No. 2. P. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.85>. [in Ukrainian].
5. Krasota M. V., Kuleshkov Yu. V., Krasota I. V., Osin R. A., Rudenko T. V. Research on improving the operational performance of diagnostic operations of electronic systems of automotive and tractor machinery. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Vol. 9(40), Part I. P. 144–151. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.144-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.144-151).
6. Krasota M. V., Shepelenko I. V., Kuleshkov Yu. V., Osin R. A., Rudenko T. V. State and directions of improving the efficiency of technical service of trucks in the agro-industrial complex. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 2024. Issue 10(41), Part II. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.161-168](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.161-168). [in Ukrainian].
7. Khaimenov O. O., Osin R. A., Krasota M. V., Kuleshkov Yu. V., Rudenko T. V. Research of ways to improve the efficiency of maintenance and repair of electronic automotive systems. *Zbirnyk prats molodykh naukovtsiv CNTU*. Issue 14. 2024. [in Ukrainian].
8. Adekunle A. A., Ikubanni P. P., Agboola O. O. An Expert System for Automobile Repairs and Maintenance. *Mindanao Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 16. P. 41–56.
9. Andersson R., Manfredsson P., Lantz B. Total productive maintenance in support processes: an enabler for operation excellence. *Total Quality Management & Business Excellence*. 2015. Vol. 26(9–10). P. 1055.

Mykhailo Krasota, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Igor Shepelenko**, Prof., DSc., **Yuriy Kuleshkov**, Prof., DSc., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Timofii Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Volodymyr Petlenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Efficiency of Vehicle Maintenance and Repair using Information Technology

The relevance of the conducted research is determined by the fact that the main objective of improving the system of technical maintenance and repair of automobiles is planning various types of work and monitoring their efficiency using information technologies.

The purpose of this work is to increase the efficiency of technological processes of automobile maintenance and repair through the use of information technologies at automotive service and transport enterprises.

The analysis of the order and content of work in the current activities of engineering and technical services of technical service enterprises made it possible to identify information for input data entry, form a processing algorithm, and obtain the necessary data for current and strategic planning.

Proposals are provided for organizing an information management system at the enterprise during the execution of technical maintenance and repair of automobiles. It is proposed to create proprietary databases for serviced vehicles, which should include information about the vehicles as well as recording time standards for technological operations of maintenance and repair.

The use of an information system for management and activity planning at enterprises of technical service for transport and technological machines will increase productivity and quality of work performance, strengthen control over personnel activities, as well as the use of rolling stock.

automobile, transport, information technologies, technical service, repair

Одержано (Received) 12.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 21.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

УДК 631.15

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.251-257](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.251-257)**О. М. Лівіцький**, канд. техн. наук, **В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,**С. В. Харченко**, **А. М. Зайцев**, **В. В. Слонь**, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Адаптивне управління технічним станом і безпекою експлуатації транспортної техніки в агропромисловому виробництві

Ресурс транспортної техніки, яка використовується в агропромисловому виробництві, зменшується з процесом експлуатації й потребує підтримки різними системами технічного обслуговування і ремонту.

Обґрунтована зміна ресурсу транспортної техніки при використанні планово-попереджувальної системи технічного обслуговування і ремонту.

Сформульована адаптивна концепція експлуатації транспортної техніки, яка орієнтована на ефективне використання ресурсів. Основою концепції є система моніторингу і прогнозування технічного стану транспортної техніки та рівня виробничого травматизму операторів. Ця інформація є достовірною для прийняття рішень щодо подальшої експлуатації транспортної техніки. Сформульовані завдання щодо забезпечення ефективного управління технічним станом і безпекою транспортної техніки у агропромисловому виробництві.

При розв'язанні цих завдань пропонується комплексний підхід до досліджуваної проблеми та розробка механізмів забезпечення та впровадження в експлуатаційну практику допустимий рівень ризику. Пропонується створення науково-методичної бази, яка дозволить на основі достовірної інформації приймати своєчасні управлінські рішення й передбачається прогнозування змін рівня технічного стану транспортної техніки і рівня небезпеки застосовувати відповідні компенсаційні заходи.

Виявлено ряд суперечностей між показниками безпеки і фактичним технічним станом транспортної техніки й пропонується шукати баланс між безпекою, ефективністю та економічністю функціонування в умовах продовження експлуатації техніки.

Результати досліджень критичних ситуацій експлуатації транспортної техніки у агропромисловому виробництві дали можливість розробити комплекс заходів для їх нейтралізації.

транспортна техніка, технічний стан, адаптивне управління, безпека експлуатації, стратегія технічного обслуговування та ремонту

Постановка проблеми. Упродовж останніх десятиліть трансформацій, що відбулися в Україні, зумовили потребу в активному впровадженні ресурсозберігаючих технологій у різних секторах економіки. Це проявляється, зокрема, у створенні нових підходів та технологій ефективного використання складної транспортної техніки (ТТ), що застосовуються в агропромисловому виробництві (АПВ). Основна ідея таких підходів полягає у впровадженні ефективних систем моніторингу та прогнозування технічного стану ТТ і сільськогосподарської техніки (СГТ). Це дозволяє оперативно та достовірно отримувати інформацію про технічний стан, управляти і приймати позитивні рішення щодо її подальшої безпечної експлуатації.

Попри значний обсяг досліджень і фінансових вкладень у забезпечення надійності, ефективності та безпеки ТТ в АПВ. Ця проблема залишається актуальною. Досі не сформовано науково обґрунтованих принципів адаптивного контролю технічного стану машин, бракує ефективних показників та методик їх оцінювання і прогнозування. Тому для забезпечення належного рівня надійності та безпеки ТТ в умовах подовженого терміну використання необхідно розробляти і впроваджувати

сучасні стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р), орієнтовані на адаптивне управління її технічним станом.

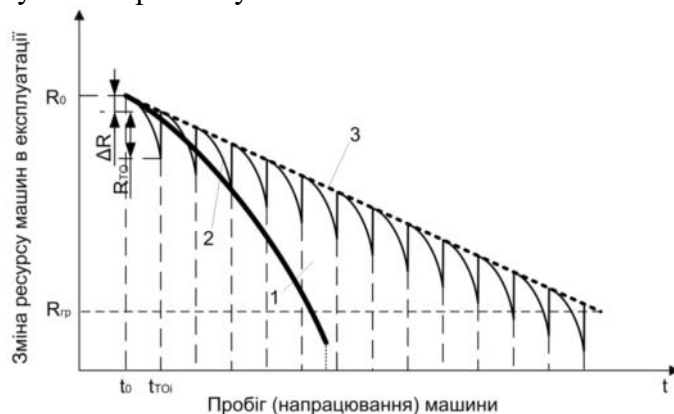
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складна економічна ситуація та багатомасштабна війна в Україні, обмежене фінансування призвели до того, що близько 50–70% техніки в АПВ [1] продовжується використовуватись на основі рішень про подовження її ресурсу та строку служби [2]. Такі рішення базуються на оцінці поточного технічного стану ТТ в АПВ [1,2]. В той час часто не враховується прогнозування зміни технічних систем і рівня безпеки ТТ під час подальшої її експлуатації. Основною причиною цього є відсутність ефективної методології індивідуального прогнозу технічного стану як окремих вузлів, систем, агрегатів, так і техніки в цілому [1].

На сьогодні модернізація або повна заміна ТТ, що вже вичерпала свій нормативний ресурс, є практично неможливою. Тому її подальше використання потребує впровадження додаткових організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення необхідного рівня надійності та безпеки ТТ у АПВ..

Дослідження [3-5] з питань управління ресурсом ТТ свідчать про недостатню розробленість науково-методичних основ, які дозволили б реалізувати сучасну концепцію адаптивного контролю її технічного стану та безпечної експлуатації [6-8]. Це створює бар'єри для підвищення ефективності системи підтримки техніки в стані готовності до виконання виробничих завдань в АПВ. Відтак, розробка методів адаптивного управління технічним станом і безпекою експлуатації ТТ в АПВ в умовах обмежених ресурсів і фінансування [1,3,2] потребує термінового вирішення.

Постановка завдання. Метою даної роботи розробка концептуальних засад і комплексу завдань, пов'язаних з управлінням технічним станом та забезпеченням безпечної експлуатації транспортної техніки в агропромисловому виробництві із застосуванням адаптивного підходу до їх вирішення.

Викладення основного матеріалу. Протягом останніх десятиліть економічні трансформації в Україні зумовили потребу в активному впровадженні ресурсозберігаючих технологій у всіх секторах господарства, особливо в агропромисловому виробництві. Ресурс транспортної техніки змінюється з процесом експлуатації в АПВ (Рис.1) й підтримується планово-попереджувальною системою технічного обслуговування і ремонту.



ΔR – втрачений ресурс в процесі експлуатації; R_{TO} – відновлюваний ресурс при ТО; R_0 – початковий ресурс при $t=t_0$; R_{gr} – граничний ресурс, при $t=t_{gr}$.

Рисунок 1 - Залежність зміни ресурсу транспортної техніки від періодичності її обслуговування і ремонту;
1 – загальний ресурс транспортної техніки при відсутності ТО; 2 – зміна ресурсу при різних періодах ТО; 3 – загальний ресурс машини при виконанні ТО

Це проявляється у переході до нових концепцій експлуатації ТТ, які орієнтовані на ефективне використання ресурсів. Основою таких концепцій є застосування систем

моніторингу і прогнозування технічного стану ТТ та рівня виробничого травматизму операторів (Рис. 2). Це дозволяє оперативно отримувати достовірну інформацію для прийняття рішень щодо подальшої експлуатації.

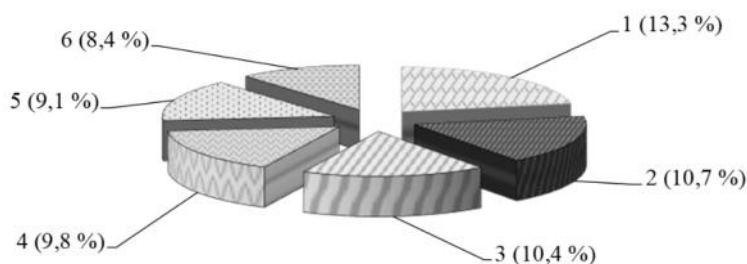


Рисунок 2 - Рівень виробничого травматизму серед операторів транспортної техніки в агропромисловому виробництві залежно від виробничих небезпек: 1 – порушення вимог безпеки під час експлуатації транспортної техніки; 2 – незадовільний технічний стан засобів агровиробництва; 3 – незадовільний технічний стан транспортної техніки засобів; 4 – алкогольне сп'яніння, токсичне отруєння; 5 – порушення правил дорожнього руху; 6 – допуск до роботи без навчання безпечним методам праці та без перевірки знань з охорони праці

Попри значну кількість досліджень і фінансові вкладення у вивчення проблеми надійності ТТ та безпеки операторів (Рис. 3), питання адаптивного управління технічним ТТ станом і безпеки руху й досі не має завершеного теоретичного обґрунтування. Відсутність чітких критеріїв ефективності та методик їх оцінювання ускладнює розробку сучасних підходів до забезпечення надійності та безпеки ТТ в АПВ, особливо в умовах продовження термінів експлуатації.

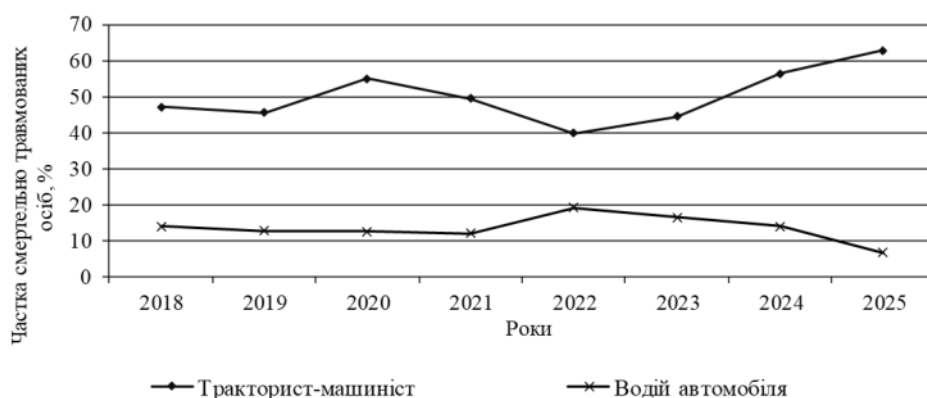


Рисунок 3 - Динаміка рівня виробничого травматизму серед операторів транспортної техніки в агропромисловому виробництві

Складна економічна ситуація та обмежене фінансування призвели до того, що більшість ТТ набула військового призначення та промислових і енергетичних об'єктів. ТТ продовжує функціонувати на основі рішень про подовження ресурсу. Хоча такі рішення враховують поточний технічний стан, вони часто не передбачають прогнозування його змін і оцінки ризиків. Це пов'язано з відсутністю ефективного методичного інструментарію для індивідуального прогнозу технічного стану ТТ як окремих елементів, так і парку машин загалом в АПВ.

Наявний рівень фінансування не дозволяє здійснювати повномасштабну модернізацію або заміну ТТ, що вичерпали свій ресурс. Тому їх подальша експлуатація потребує впровадження додаткових організаційно-технічних заходів, спрямованих на підтримання заданого рівня надійності.

Суперечність між вимогами до надійності ТТ і реальними можливостями її технічного обслуговування в умовах обмежених ресурсів свідчить про потребу в перегляді підходів до управління. Під ресурсами слід розуміти: технічні засоби

обслуговування, залишковий ресурс систем, фінансування, запаси комплектуючих, структуру запасних частин тощо.

Наразі переважає «жорстка» стратегія технічного обслуговування та яка базується на апіорній інформації. Такий підхід формує розімкнену систему управління, де технічний стан ТТ є об'єктом, а заходи обслуговування — керуючими діями, що не враховують змінні умови експлуатації.

Адаптивні системи, навпаки, компенсують нестачу попередніх даних за рахунок використання актуальної (апостеріорної) інформації. Вони дозволяють коригувати параметри обслуговування ТТ на основі оцінки та прогнозу технічного стану, формуючи замкнені системи так званним адаптивним управлінням.

Розв'язання проблеми управління технічним станом ТТ в АПВ передбачає узгодження бажаних і фактичних результатів функціонування системи підтримки. Це вимагає створення спеціалізованого методичного апарату, здатного забезпечити адаптивне управління технічним станом і безпекою експлуатації. Сформовано сукупність відповідних завдань (рис.4).

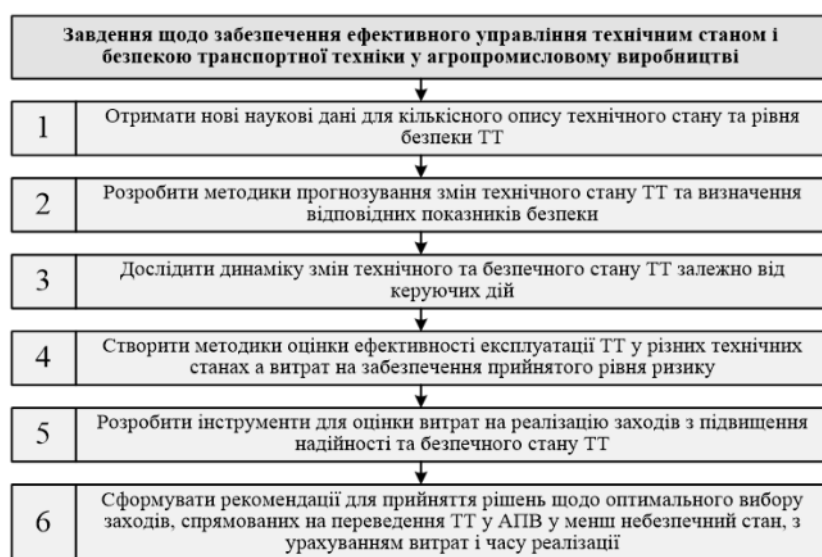


Рисунок 4 – Блок-схема сукупності завдань забезпечення належним технічним станом та рівнем безпеки транспортної техніки у агропромисловому виробництві

Питання безпеки є не менш важливими. Започаткована Державна науково-технічна програма «Безпека», яка передбачала розробку теоретичних основ, нормативно-технічних засобів і методів захисту населення та довкілля від природних і техногенних катастроф. Програма окреслила чотири ключові напрями: фундаментальні дослідження, нові критерії безпеки, системи оповіщення та захисту, а також нормативно-законодавче регулювання.

Сучасний науковий підхід до безпеки вимагає комплексного аналізу аварійних ситуацій, класифікації ризиків, оцінки граничних параметрів міцності, зносостійкості, вібрацій, акустичних характеристик, механіки руйнування, живучості технічних об'єктів і впливу на персонал та довкілля. Для цього необхідні математичні моделі, комп'ютерне моделювання та фізичне моделювання процесів розвитку надзвичайних ситуацій і катастроф.

У розвитку теорії безпеки ТТ у АПВ можна виділити два етапи: перший — теорія абсолютної надійності, яка передбачала повне виключення аварій за рахунок технічних рішень; другий — імовірнісний підхід, що визнає неможливість повного усунення ризиків і пропонує керування ними через оцінку ймовірностей. Основна складність полягає в тому, що для транспортних об'єктів в АПВ не так легко отримати

достовірну статистику або побудувати теоретичні моделі для обчислення ризиків.

Традиційна модель аналізу надійності, що базується на побудові дерева відмов, здебільшого враховує лише прямі зв'язки між окремими компонентами такої складної технічної системи як ТТ в АПВ. Проте в реальних умовах такі системи характеризуються складною структурою взаємодії, де елементи впливають один на одного, формуючи багаторівневі причинно-наслідкові залежності.

У багатьох випадках найвразливішим елементом системи є людина, тому оцінка її надійності та безпеки неможлива без урахування людського фактора. Це породжує потребу в комплексному підході до аналізу ризиків у соціально-технологічних системах.

На сьогоднішній день значну загрозу для персоналу та населення становлять об'єкти підвищеної небезпеки, пов'язані з ТТ, зокрема, ядерні, хімічні, військові установки та комплекси, які мають високий потенціал виникнення аварійних ситуацій. Особливості експлуатації ТТ в АПВ лише загострюють проблему забезпечення безпеки, яка, попри свою важливість, залишається недостатньо дослідженою на науковому рівні та вирішується переважно інтуїтивно на практиці.

Відсутність систематизованого методичного апарату для нормування вимог до безпечної експлуатації ТТ, а також для аналізу та обґрунтування відповідних заходів, свідчить про необхідність розробки нових підходів. Необхідність досліджень у цьому напрямі обумовлена ще й потребою врахування реального технічного стану ТТ й обладнання в АПВ та функціонального стану персоналу.

Наразі вимоги до ефективності систем безпеки формуються переважно якісно, з очікуванням повного виключення небезпечних подій. Однак практика демонструє, що щороку в процесі експлуатації ТТ в АПВ трапляються аварії, поломки, травми, професійні захворювання та інші негативні явища.

Сучасна концепція безпеки визнає неможливість абсолютного захисту, тому виникає потреба у визначенні допустимого рівня ризику, розробці механізмів його забезпечення та впровадженні в експлуатаційну практику. Для реалізації таких механізмів необхідно створити науково-методичну базу, яка дозволить на основі достовірної інформації про передумови аварій, пов'язаних з ТТ у АПВ, приймати своєчасні управлінські рішення. Це передбачає прогнозування змін рівня небезпеки та застосування відповідних компенсаційних заходів.

Суперечність між заданими показниками безпеки, фактичним технічним станом ТТ, можливостями систем управління ризиками та обмеженим фінансуванням вказує на потребу пошуку балансу між безпекою, ефективністю та економічною доцільністю в умовах продовження термінів експлуатації одиниць ТТ і парку машин в цілому.

Післягарантійна експлуатація ТТ у АПВ супроводжується дією численних випадкових небезпечних факторів, а відсутність універсального інструменту для виявлення критичних взаємозв'язків ускладнює прогнозування безпеки технологічних процесів. Методи математичної статистики, зокрема багатофакторний кореляційний аналіз, поки що не дали очікуваних результатів, що свідчить про необхідність пошуку нових підходів.

Дослідження критичних ситуацій експлуатації ТТ у АПВ та небезпечних факторів, а також розробка комплексу заходів для їх нейтралізації, мають враховувати:

- значну кількість джерел небезпеки експлуатації ТТ та потребу в ідентифікації причин їх виникнення;
- необхідність аналізу повного спектру можливих заходів реагування;
- ієрархічну структуру чинників ризику та потребу в багаторівневому аналізі їх впливу.

Ці особливості унеможливають повноцінне розуміння проблеми підвищення експлуатаційної надійності та безпеки експлуатації ТТ у АПВ на основі аналізу

окремих випадків, тому потрібен системний підхід.

Для забезпечення ефективного управління технічним станом і безпекою ТТ у АПВ необхідно вирішити наступну низку завдань:

- отримати нові наукові дані для кількісного опису технічного стану ТТ та рівня безпеки її експлуатації в АПВ;
- розробити методики прогнозування змін технічного стану ТТ та визначення відповідних показників безпеки в експлуатації;
- дослідити динаміку змін технічного та безпечного стану ТТ залежно від керуючих дій;
- створити методики оцінки ефективності експлуатації ТТ у різних технічних станах та витрат на забезпечення прийнятного рівня ризику;
- розробити математичний інструментарій для оцінки витрат на реалізацію заходів з підвищення надійності та ефективності використання ТТ у АПВ;
- сформувати рекомендації для прийняття рішень щодо оптимального вибору заходів, спрямованих на переведення парку ТТ у АПВТ у менш небезпечний стан з урахуванням витрат і часу реалізації.

Наукові дослідження у цьому напрямі ведуться в Центральнотехнічному національному університеті і вже отримано низку важливих результатів. Проте більшість публікацій зосереджені на окремих аварійних ситуаціях, без належної систематизації. Це свідчить про нагальну потребу у створенні підходів до кількісного системного аналізу управління технічним станом і безпекою транспортної техніки у агропромисловому виробництві.

Висновки. 1. Визначено, що адаптивне управління технічним станом і безпекою експлуатації транспортної техніки у агропромисловому виробництві є необхідною умовою підвищення її надійності та ефективності використання

2. З'ясовано, що реалізація адаптивного управління потребує управління технічним станом і безпекою транспортної техніки, комплексного підходу, що поєднує технічні, організаційні та соціальні аспекти.

3. Показано, що подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих систем підтримки прийняття рішень, що базуються на реальному моніторингу та прогнозуванні технічного стану і ризиків виникнення дорожньо-транспортних пригод, аварій та катастроф у агропромисловому виробництві.

Список літератури

1. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. Ауліна В. В. Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. 370 с.
2. Аулін В. В., Лівіцький О. М. Інформаційне забезпечення в системі технічного сервісу, діагностичного моніторингу та охорони праці в сільськогосподарському виробництві. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кіровоград: КНТУ, 2009. Вип. 39. С. 287–291.
3. Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В., Волков Ю. В., Володарець М. В. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів. Харків: ХНАДУ, 2018. 300 с.
4. Аулін В. В., Лівіцький О. М., Жулай О. Ю. Стан проблеми підвищення ефективності технічного сервісу сільськогосподарської техніки в нових умовах господарювання. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2007. Вип. 37. С. 158–162.
5. Аулін В. В., Лівіцький О. М. Система трибомоніторингу технічного стану мобільної сільськогосподарської техніки – інженерно-технічне рішення її безпеки. *Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв: НУК, 2009. С. 182–184.
6. Конкурентні стратегії безпеки розвитку України у глобальному середовищі : монографія / ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України»; за заг. ред. А. І. Мокія. Львів, 2019. 872 с.
7. Волков В. П., Грицук І. В., Грицук Ю. В., Волков Ю. В. Особливості інформаційної системи моніторингу та прогнозування параметрів технічного стану двигуна та транспортного засобу в умовах ITS // *Сучасні технології у машинобудуванні та транспорті : науковий журнал*. 2016. № 2(6). С. 43–49.
8. Шаша І. К. Технічні напрями підтримки працездатності автобронетанкової техніки Національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2021.

Вип. 1 (37). С. 89–95.

9. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лівіцький О. М. Підвищення надійності мобільної та автотранспортної техніки сільськогосподарського виробництва на основі діагностики їх стану. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 163–164.

References

1. Aulin, V. V., Holub, D. V., Hryn'kiv, A. V., & Lysenko, S. V. (2017). Methodological and theoretical foundations for ensuring and improving the reliability of automobile transport systems functioning: Monograph. Kropyvnytskyi: Vydavets "KOD" [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., & Livitskyi, O. M. (2009). Information support in the system of technical service, diagnostic monitoring and labor protection in agricultural production. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kykh mashyn*, (39), 287–291 [in Ukrainian].
3. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Hrytsuk, Yu. V., Volkov, Yu. V., & Volodarets, M. V. (2018). Information systems for monitoring the technical condition of automobiles. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Livitskyi, O. M., & Zhulai, O. Yu. (2007). The state of the problem of improving the efficiency of technical service of agricultural machinery in new economic conditions. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kykh mashyn*, (37), 158–162 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., & Livitskyi, O. M. (2009). Tribomonitoring system of technical condition of mobile agricultural machinery as an engineering and technical solution for its safety. In *Sudnova energetyka: stan ta problemy: materialy IV mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (pp. 182–184). Mykolaiv: NUK [in Ukrainian].
6. Mokii, A. I. (Ed.). (2019). Competitive security strategies for Ukraine's development in the global environment: Monograph. Lviv: DU "Instytut rehionalnykh doslidzhen imeni M. I. Dolishnoho NAN Ukrainy" [in Ukrainian].
7. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Hrytsuk, Yu. V., & Volkov, Yu. V. (2016). Features of the information system for monitoring and forecasting engine and vehicle technical condition parameters in ITS conditions. *Suchasni tekhnolohiyi u mashynobuduvanni ta transporti: naukovyy zhurnal*, 2(6), 43–49 [in Ukrainian].
8. Shasha, I. K. (2021). Technical directions for maintaining the operability of armored vehicles of the National Guard of Ukraine. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsionalnoyi akademiyi Natsionalnoyi hvardiyi Ukrainy*, 1(37), 89–95 [in Ukrainian].
9. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Livitskyi, O. M. (2015). Increasing the reliability of mobile and road agricultural machinery based on diagnostics of their condition. In *Problemy konstruyuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsiyi sil'skohospodars'koyi tekhniky: materialy X Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 163–164). Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].

Oleksandr Livytskyi, PhD., **Victor Aulin**, Prof., DSc., **Serhii Kharchenko**, **Andrii Zaitsev**, **Victor Slon**, PhD
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Adaptive Management of the Technical Condition and Safety of Operation of Transport Equipment in Agro-Industrial Production

The resource of transport equipment used in agro-industrial production decreases with the process of operation and requires support from various maintenance and repair systems.

The change in the resource of transport equipment when using a planned and warning system of maintenance and repair is justified.

An adaptive concept of the operation of transport equipment is formulated, which is focused on the efficient use of resources. The basis of the concept is a system of monitoring and forecasting the technical condition of transport equipment and the level of occupational injuries of operators. This information is reliable for making decisions on the further operation of transport equipment. Tasks are formulated to ensure effective management of the technical condition and safety of transport equipment in agro-industrial production.

When solving these tasks, a comprehensive approach to the problem under study is proposed and mechanisms are developed to ensure and implement in operational practice an acceptable level of risk. It is proposed to create a scientific and methodological base that will allow timely management decisions to be made on the basis of reliable information, and it is envisaged to predict changes in the level of technical condition of transport equipment and the level of danger to apply appropriate compensatory measures.

A number of contradictions between safety indicators and the actual technical condition of transport equipment have been identified, and it is proposed to seek a balance between safety, efficiency and cost-effectiveness of operation in the conditions of continued operation of equipment.

The results of studies of critical situations in the operation of transport equipment in agro-industrial production made it possible to develop a set of measures to neutralize them.

transport equipment, technical condition, adaptive management, operational safety, maintenance and repair strategy

Одержано (Received) 12.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

УДК 629.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.258-265](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.258-265)

А. І. Папінко¹, канд. екон. наук, В. М. Мосьпан², канд. техн. наук,
М. Р. Башуцький¹, В. В. Бірючинський¹, О. І. Попович¹

¹Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна

²Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

e-mail: andriypapinko@gmail.com

Дослідження деформовано-напруженого стану несучої рами напівпричепів

Робота присвячена аналізу деформовано-напруженого стану несучих рам напівпричепів, що експлуатуються в складних умовах. Застосовано модифікований метод мінімуму потенціальної енергії деформації з урахуванням енергій згину та кручення. Використання функції Хевісайда дозволило ефективно обробити зміни жорсткостей конструкції. Моделювання дозволило оптимізувати конструкцію рами та її вузлів, підвищити надійність і зменшити матеріаломісткість. Це забезпечує довговічність та безпеку експлуатації напівпричепів.

напівприче́пи, несуча ра́ма, деформовано-напру́жений стан, потенціально́на енергі́я деформації́

Постановка проблеми. Сучасний розвиток транспортної інфраструктури та інтенсифікація вантажних перевезень висувають підвищені вимоги до конструктивної міцності та довговічності напівпричепів. Несучі рами цих транспортних засобів, постійно функціонують в екстремальних умовах – високі швидкості, значні та динамічні зовнішні навантаження, а також вплив агресивних середовищ. Ці чинники створюють комплексний виклик для інженерних рішень, оскільки існуючі підходи до проектування часто не забезпечують повної оптимізації надійності та довговічності конструкції при одночасному прагненні до зниження її матеріаломісткості. Фактичний стан справ демонструє, що існуючі методики моделювання напружено-деформованого стану не завжди адекватно відображають усі тонкощі взаємодії рами з різновекторними навантаженнями, зокрема, ігноруючи або недостатньо враховуючи складний характер комбінованої дії згинальних та крутильних зусиль, а також наявність критичних зон зі значними перепадами жорсткостей. Недостатня точність у виявленні зон максимальної напруги та потенційних ділянок руйнування може призвести не лише до прискореного зносу, а й до серйозних аварійних ситуацій та, як наслідок, до суттєвого збільшення експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна наукова література приділяє значну увагу підвищенню міцності та довговічності напівпричепів, особливо в умовах інтенсивної експлуатації. Існуючі методи моделювання напружено-деформованого стану не завжди точно враховують усі тонкощі взаємодії рами з різновекторними навантаженнями, зокрема комбіновану дію згинальних та крутильних зусиль, а також перепади жорсткостей. Це може призвести до прискореного зносу, аварій та збільшення експлуатаційних витрат. Тому виникає потреба у вдосконаленні підходів до моделювання для забезпечення надійності та довговічності конструкції при одночасному зниженні її матеріаломісткості.

У роботі [1] досліджували напружено-деформований стан тягової рами напівпричепного скрепера за допомогою комп'ютерних обчислювальних методів, зокрема програмного комплексу Ansys. Автори наголошують на необхідності визначення напружено-деформованого стану елементів та конструкцій при проектуванні машин.

Вони підкреслюють, що числові методи, такі як метод скінченних елементів, дозволяють скоротити дорогі експериментальні перевірки міцності конструкцій завдяки використанню дешевшого комп'ютерного моделювання.

У дослідженні [2] було детально проаналізовано напружено-деформований стан рами бурякозбирального комбайна КС-6Б-10. Автори акцентували увагу на складності проектування несучих конструкцій техніки, зумовленої їхньою просторовою геометрією, різноманітністю елементів та високим ступенем статичної невизначеності розрахункових схем, а також складним характером навантажень. Для подолання цих викликів було застосовано метод скінченних елементів з використанням програмного комплексу «ЛПРА-9.6», що дозволило прискорити розрахунки НДС несучих конструкцій на основі дискретних моделей.

В праці [3] було досліджено напружено-деформований стан рам вібраційних платформ, оснащених вертикальними та горизонтальними віброзбуджувачами. Особливу увагу приділено жорсткості рам під дією як вертикальних, так і горизонтальних навантажень. В рамках дослідження було розраховано прогини в елементах металевої рами та вивчено тип розподілу напружень. Автори визначили місця концентрації напружень для досліджуваних конструкцій вібраційних платформ. Виявлено, що значення цих напружень значно менші за розрахунковий опір сталі, що вказує на можливість оптимізації конструкції рами шляхом зменшення її металомісткості до 20%.

Авторами [4] проведено оцінку напружено-деформованого стану металоконструкцій портових перевантажувальних машин. Дослідження викликане занепокоєнням щодо стану цих конструкцій в українських портах, що потерпають від корозії, механічного зношування, відсутності модернізації та обмеженості ресурсів для технічного обслуговування. Оскільки машини експлуатуються десятиліттями, вони зазнають суттєвого зносу, що знижує їхню несучу здатність та підвищує ризики. Метою дослідження є визначення напружено-деформованого стану для забезпечення їхньої надійності та безпечної експлуатації в існуючих умовах.

У статті [5] увагу акцентовано на формуванні спрямованого напружено-деформованого стану в конструктивних елементах вантажних вагонів. Робота ґрунтується на концепції попередніх напружень і має на меті підвищити надійність та довговічність рухомого складу. Автори провели глибокий аналіз експлуатаційних пошкоджень, а також оцінили конструктивну доцільність та технологічні можливості для вибору оптимальних місць застосування попередніх напружень, систематизувавши їх у структурно-декомпозиційній схемі. Науково обґрунтовано як саму доцільність, так і конкретні методи реалізації такого спрямованого напружено-деформованого стану, що було теоретично проілюстровано на прикладі вагона-цистерни. Це дослідження підтверджує можливість ефективного управління внутрішніми силами в конструкції для покращення її експлуатаційних характеристик.

Постановка завдання. Стаття має на меті здійснити глибокий аналіз деформовано-напруженого стану несучих рам напівпричепів, особливо тих, що функціонують в умовах значних навантажень та агресивних середовищ. Це дослідження спрямоване на вдосконалення існуючих підходів до моделювання напружено-деформованого стану за допомогою модифікованого методу мінімуму потенціальної енергії деформації. Ключовим аспектом буде детальний облік енергій згину та кручення, що є важливим для точного відображення реальних умов експлуатації. Для ефективного опрацювання особливостей, пов'язаних зі значними змінами та перепадами жорсткостей у конструкціях, буде застосовано функцію Хевісайда. Кінцевим результатом роботи стане формування обґрунтованих

рекомендацій щодо раціоналізації конструювання як окремих складових вузлів, так і всієї рамної конструкції, що дозволить підвищити її надійність, зменшити матеріаломісткість та забезпечити довговічність і безпечну експлуатацію напівпричепи.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах, де технологічні процеси виконуються в складних умовах на значних швидкостях, а обладнання працює в агресивних середовищах, несучі рами напівпричепів зазнають значних зовнішніх навантажень, до яких належить: удари та вібрації, які виникають при русі по нерівній дорозі; крутильні навантаження, які виникають через нерівномірний розподіл вантажу; навантаження від агресивних середовищ, таких як корозія та абразивний знос. З огляду на ці експлуатаційні характеристики, такі рамні конструкції в машинобудуванні відносяться до III класу зварних рам [6, 7, 11]. Для забезпечення надійності та довговічності, а також для оптимізації конструкції, виникає потреба у створенні раціональних несучих систем даного типу. Це завдання успішно вирішується шляхом максимально коректного та детального моделювання їх напружено-деформованого стану. Таке моделювання обов'язково враховує всі можливі зовнішні навантаження, які діють на напівпричепи, розглядаючи їх як комплексні функції умов роботи. Особлива увага приділяється аналізу деформовано-напруженого стану несучої рами напівпричепів, щоб виявити найбільш вразливі ділянки та оптимізувати розподіл навантажень. Такий підхід дозволяє не тільки підвищити міцність конструкції, але й знизити її матеріаломісткість, що є ключовим фактором для економічної ефективності та ресурсозбереження. Для дослідження нами було розглянуто напівпричепи виробництва АТ «РІВНЕСІЛЬМАШ».

Удосконалення надійності є критично важливим аспектом для базової просторово навантаженої несучої конструкції напівпричепів та її окремих вузлів. Вивчення та оптимізація їх деформовано-напруженого стану стає основою для забезпечення довговічності та безпечної експлуатації. Ця робота ґрунтується на детальному моделюванні напружено-деформованого стану, використовуючи модифікований метод мінімуму потенціальної енергії деформації. Особлива увага приділяється врахуванню енергій згину та кручення, що дозволяє більш точно відобразити реальні умови експлуатації. Раціоналізація методу досягається за допомогою застосування функції Хевісайда $H(x)$, яка дозволяє ефективно обробляти особливості зміни та значних перепадів жорсткостей, характерних для подібних конструкцій. Такий підхід дає можливість розробити більш міцні та одночасно матеріаломісткі конструкції.

У роботі розглядається плоска просторово-навантажена рамна конструкція, що є центральною складовою несучої системи сучасних напівпричепів. Ця рама являє собою високонадійну зварну несучу конструкцію, ретельно спроектовану для витримування значних навантажень та забезпечення стабільності під час експлуатації. Її архітектура включає два поздовжні лонжерони, з довжиною l , що оптимально розрахована для конкретних експлуатаційних умов [8, 9, 12]. Ці лонжерони надійно з'єднані між собою за допомогою міцної передньої балки та системи поперечин. Така конфігурація дозволяє ефективно розподіляти зовнішні навантаження, мінімізуючи локальні деформації та забезпечуючи загальну міцність і довговічність усієї несучої конструкції напівпричепів.

При аналізі завантаженості просторово-навантаженої рамної конструкції, що є невід'ємною частиною несучої системи напівпричепів, домінуючими факторами виступають значні зусилля P_i , що виникають від транспортованої маси вантажу. Ці навантаження створюють складний деформовано-напружений стан у всій конструкції. Крім того, важливим є вплив динамічних навантажень P_b , які можуть виникати під час

руху, гальмування, проходження нерівностей дороги або роботи допоміжного обладнання, що може бути інтегроване в напівпричіп. У місцях контакту з'єднання осей ходових коліс напівпричіпа з лонжеронами рами діють суттєві реакції R_0, R'_0, R_1, R'_1 та R_2, R'_2 .

Згідно з розрахунковою схемою, що відображає особливості несучої системи напівпричіпів, загальний вираз функції потенціальної енергії деформації рами формулюється як сума енергії, що накопичується внаслідок згинання, та енергії, спричиненої крученням, для обох її частин [9, 13]. Цей підхід дозволяє всебічно врахувати вплив усіх типів деформацій на конструкцію напівпричіпа, що є основою для подальшого аналізу міцності та оптимізації її елементів.

$$U = U_I + U_{II} = U_{IM} + U_{IK} + U_{IIM} + U_{IIK} \quad (1)$$

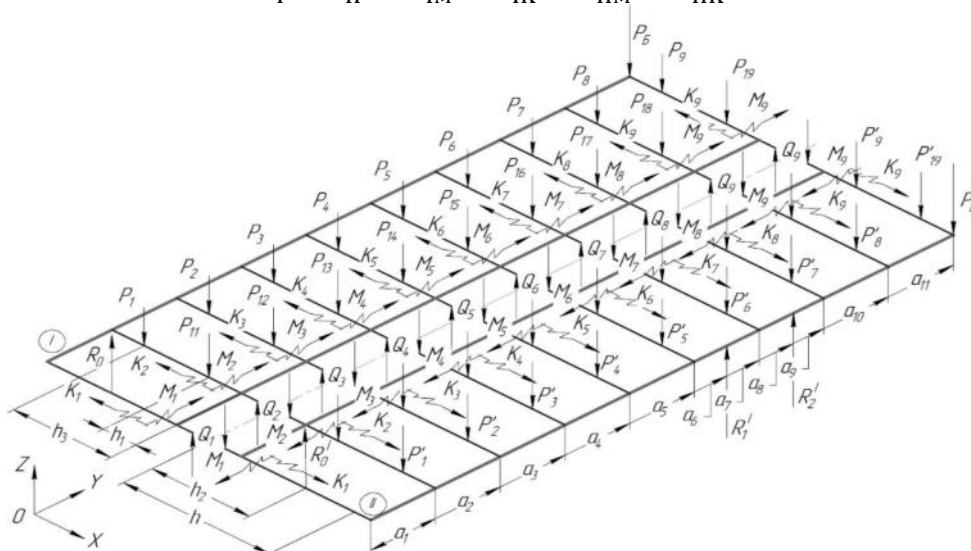


Рисунок 1 – Розрахункова модель несучої рами напівпричіпа

Джерело: розроблено авторами

На рисунку зображено розрахункову модель, основні компоненти та позначення включають: P – зовнішні зосереджені навантаження; M – зосереджені моменти, що діють на конструкцію; Q – поперечні сили; K – жорсткості пружних зв'язків, які моделюють реакцію основи; h, a – розміри елементів; R – опорні реакції крайових пружних зв'язків.

$$\begin{aligned}
 U_{IM} = & \frac{1}{EI_1} \left[\int_0^l (K_1 - Q_1 s - R_0 s + (K_2 - Q_2 s + (P_1 + P_{11}))) H(s - a_1) + (K_3 - Q_3 s + \right. \\
 & + (P_2 + P_{12})) H(s - a_2) + (K_4 - Q_4 s + (P_3 + P_{13})) H(s - a_3) + (K_5 - Q_5 s + (P_4 + P_{14})) H(s - \\
 & - a_4) + (K_6 - Q_6 s + (P_5 + P_{15})) H(s - a_5) - R_1 s H(s - a_6) + (K_7 - Q_7 s + \\
 & + (P_6 + P_{16})) H(s - a_7) - R_2 s H(s - a_8) + (K_8 - Q_8 s + (P_7 + P_{17})) H(s - a_9) + (K_9 - Q_9 s + \\
 & + (P_8 + P_{18})) H(s - a_{10}))^2 ds \Big] + \frac{1}{2EI_2} \left[\int_0^h (M_1 - Q_1 s - R_0 s H(s - h_2))^2 ds + \int_0^h (M_2 - Q_2 s + \right. \\
 & + P_{11} H(s - h_1) + P_1 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_3 - Q_3 s + P_{12} H(s - h_1) + P_2 H(s - h_3))^2 ds + \\
 & + \int_0^h (M_4 - Q_4 s + P_{13} H(s - h_1) + P_3 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_5 - Q_5 s + P_{14} H(s - h_1) + \\
 & + P_4 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_6 - Q_6 s + P_{15} H(s - h_1) + P_5 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_7 - Q_7 s + \\
 & + P_{16} H(s - h_1) + P_6 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_8 - Q_8 s + P_{17} H(s - h_1) + P_7 H(s - h_3))^2 ds + \\
 & \left. + \int_0^h (M_9 - Q_9 s + P_{19} H(s - h_1) + P_9 H(s - h_3))^2 ds \right]
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
U_{IK} = & \frac{1}{2GI_{k1}} \left[\int_0^l (M_1 - Q_1h - R_0(h - h_2) + (M_2 - Q_2h + P_1(h - h_3) + P_{11}(h - \right. \\
& - h_1)) \times H(s - a_1) + (M_3 - Q_3h + P_2(h - h_3) + P_{12}(h - h_1))H(s - a_2) + \\
& + (M_4 - Q_4h + P_3(h - h_3) + P_{13}(h - h_1))H(s - a_3) + (M_5 - Q_5h + P_4(h - \\
& - h_3) + P_{14}(h - h_1)) \times H(s - a_4) + (M_6 - Q_6h + P_5(h - h_3) + P_{15}(h - \\
& - h_1))H(s - a_5) + (M_7 - Q_7h + P_6(h - h_3) + P_{16}(h - h_1))H(s - a_7) + \\
& + (M_8 - Q_8h + P_7(h - h_3) + P_{17}(h - h_1)) \times H(s - a_9) + (M_9 - Q_9h + \\
& + P_8(h - h_3) + P_{18}(h - h_1))H(s - a_{10}))^2 ds + \\
& + \int_0^l (M_1 - R_0h_2 + (M_2 + P_1h_3 + P_{11}h_1)H(s - a_1) + (M_3 + P_2h_3 + \\
& + P_{12}h_1)H(s - a_2) + (M_4 + P_3h_3 + P_{13}h_1)H(s - a_3) + (M_5 + P_4h_3 + \\
& + P_{14}h_1)H(s - a_4) + (M_6 + P_5h_3 + P_{15}h_1)H(s - a_5))^2 ds + (M_7 + P_6h_3 + \\
& + P_{16}h_1)H(s - a_7) + (M_8 + P_7h_3 + P_{17}h_1) \times H(s - a_9))^2 ds + (M_9 + \\
& + P_8h_3 + P_{18}h_1)H(s - a_{10}))^2 ds] + \\
& + \frac{1}{2GI_{k2}} \int_0^h K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 + K_4^2 + K_5^2 + K_5^2 + K_7^2 + K_8^2 + K_9^2 ds
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
U_{IIM} = & \frac{1}{EI_1} \left[\int_0^l (Q_1s - K_1 - R_0s + (Q_2s - K_2 + (P_1 + P_{11}))H(s - a_1) + \right. \\
& (Q_3s - K_3 + (P_2 + P_{12}))H(s - a_2) + (Q_4s - K_4 + (P_3 + P_{13}))H(s - a_3) + \\
& + (Q_5s - K_5 + (P_4 + P_{14})) \times H(s - a_4) + (Q_6s - K_6 + (P_5 + P_{15}))H(s - a_5) - \\
& - R_1sH(s - a_6) + (Q_7s - K_7 + (P_6 + P_{16})) \times H(s - a_7) - R_2sH(s - a_8) + \\
& + (Q_8s - K_8 + (P_7 + P_{17}))H(s - a_9) + (Q_9s - K_9 + (P_8 + P_{18})) \times H(s - a_{10}))^2 ds] + \\
& + \frac{1}{2EI_2} \left[\int_0^h (M_1 + Q_1s - R_0sH(s - h_2))^2 ds + \right. \\
& + \int_0^h (M_2 + Q_2s + P_{11}H(s - h_1) + P_1H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_3 + Q_3s + P_{12}H(s - h_1) + P_2H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_4 + Q_4s + P_{13}H(s - h_1) + P_3H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_5 + Q_5s + P_{14}H(s - h_1) + P_4H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_6 + Q_6s + P_{15}H(s - h_1) + P_5H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_7 + Q_7s + P_{16}H(s - h_1) + P_6H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_8 + Q_8s + P_{17}H(s - h_1) + P_7H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_9 + Q_9s + P_{19}H(s - h_1) + P_9H(s - h_3))^2 ds]
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
U_{IUK} = & \frac{1}{2GI_{k1}} \left[\int_0^l (M_1 + Q_1h - R_0(h - h_2) + (M_2 + Q_2h + P_1(h - h_3) + P_{11}(h - h_1))H(s - \right. \\
& - a_1) + (M_3 + Q_3h + P_2(h - h_3) + P_{12}(h - h_1))H(s - a_2) + (M_4 + Q_4h + \\
& + P_3(h - h_3) + P_{13}(h - h_1)) \times H(s - a_3) + (M_5 + Q_5h + P_4(h - h_3) + \\
& + P_{14}(h - h_1))H(s - a_4) + (M_6 + Q_6h + P_5(h - h_3) + P_{15}(h - h_1))H(s - \\
& - a_5) + (M_7 + Q_7h + P_6(h - h_3) + P_{16}(h - h_1))H(s - a_7) + (M_8 + Q_8h + \\
& + P_7(h - h_3) + P_{17}(h - h_1))H(s - a_9) + (M_9 + Q_9h + P_8(h - h_3) + P_{18}(h - \\
& - h_1))H(s - a_{10}))^2 ds + \\
& + \int_0^l (M_1 - R_0h_2 + (M_2 + P_1h_3 + P_{11}h_1)H(s - a_1) + (M_3 + P_2h_3 + \\
& + P_{12}h_1)H(s - a_2) + (M_4 + P_3h_3 + P_{13}h_1)H(s - a_3) + (M_5 + P_4h_3 + \\
& + P_{14}h_1)H(s - a_4) + (M_6 + P_5h_3 + P_{15}h_1)H(s - a_5))^2 ds + (M_7 + P_6h_3 + \\
& + P_{16}h_1)H(s - a_7) + (M_8 + P_7h_3 + P_{17}h_1)H(s - a_9))^2 ds + (M_9 + P_8h_3 + \\
& + P_{18}h_1) \times H(s - a_{10}))^2 ds] + \frac{1}{2GI_{k2}} \int_0^h K_1^2 + \\
& K_2^2 + K_3^2 + K_4^2 + K_5^2 + K_5^2 + K_7^2 + K_8^2 + K_9^2 ds
\end{aligned} \tag{5}$$

На підставі правила Лейбніца про диференціювання підінтегральних функцій потенціальної енергії деформації за невідомими параметрами та теореми про найменшу роботу, кожен із похідних від потенціальної енергії деформації несучої системи напівпричепів прирівнюємо до нуля. В результаті цього процесу отримуємо систему

лінійних канонічних рівнянь, кількість яких відповідає кількості статично невизначених зусиль[10].

$$\frac{\partial U}{\partial M_i} = 0; \frac{\partial U}{\partial K_i} = 0; \frac{\partial U}{\partial Q_i} = 0 \quad (6)$$

Шукані згинальний і крутний моменти, а також поперечну силу для несучої системи напівпричепів визначаємо за наступними вихідними даними.

Зовнішні навантаження, отримано експериментально:

$P_1 = 1661\text{Н}; P'_1 = 1673\text{Н}; P_2 = 2030\text{Н}; P'_2 = 1964\text{Н}; P_3 = 2743\text{Н}; P'_3 = 2871\text{Н}; P_4 = 3128\text{Н}; P'_4 = 3026\text{Н}; P_5 = 3749\text{Н}; P'_5 = 3740\text{Н}; P_6 = 4186\text{Н}; P'_6 = 4277\text{Н};$
 $P_7 = 5050\text{Н}; P'_7 = 5423\text{Н}; P_8 = 5697\text{Н}; P'_8 = 5921\text{Н}; P_9 = 6636\text{Н}; P'_9 = 6496\text{Н};$
 $P_{11} = 1570\text{Н}; P'_{11} = 1810\text{Н}; P_{12} = 2172\text{Н}; P'_{12} = 2254\text{Н}; P_{13} = 2967\text{Н}; P'_{13} = 3079\text{Н};$
 $P_{14} = 3488\text{Н}; P'_{14} = 3325\text{Н}; P_{15} = 4054\text{Н}; P'_{15} = 3960\text{Н}; P_{16} = 4915\text{Н}; P'_{16} = 4752\text{Н};$
 $P_{17} = 5610\text{Н}; P'_{17} = 5791\text{Н}; P_{18} = 6282\text{Н}; P'_{18} = 6435\text{Н}; P_{19} = 6980\text{Н}; P'_{19} = 7044\text{Н}.$
 $P_B = 1960\text{Н}; P'_B = 2146\text{Н}$

Фізичні та геометричні характеристики, одержані з креслення і властивостей матеріалу конструкції:

$a_1 = 0,480\text{м}; a_2 = 0,705\text{м}; a_3 = 0,705\text{м}; a_4 = 0,705\text{м}; a_5 = 0,705\text{м}; a_6 = 0,100\text{м}; a_7 = 0,480\text{м};$
 $a_8 = 0,150\text{м}; a_9 = 0,495\text{м}; a_{10} = 0,645\text{м}; a_{11} = 0,645\text{м}; h = 1,010\text{м}; h_1 = 0,365\text{м};$
 $h_2 = 0,645\text{м}; h_3 = 0,750\text{м}; I_1 = 177,258 \cdot 10^{-7}\text{м}^4; I_{k1} = 10,9673 \cdot 10^{-7}\text{м}^4; I_2 = 1,72294 \cdot 10^{-7}\text{м}^4;$
 $I_{k2} = 38,6459 \cdot 10^{-10}\text{м}^4; E = 2,1 \cdot 10^5\text{МПа}; G = 8 \cdot 10^4\text{МПа}$

Зовнішні опорні реакції статично визначені, відносно шуканих внутрішніх невідомих параметрів:

$R_0 = 8632\text{Н}; R'_0 = 9078\text{Н}; R_1 = 32512\text{Н}; R'_1 = 33528\text{Н};$
 $R_2 = 31746\text{Н}; R'_2 = 32184\text{Н}.$

В підсумку при розв'язку системи рівнянь отримаємо:

$M_1 = -1758\text{Н} \cdot \text{м}; M_2 = -3235\text{Н} \cdot \text{м}; M_3 = -2704\text{Н} \cdot \text{м}; M_4 = -2607\text{Н} \cdot \text{м};$
 $M_5 = -2178\text{Н} \cdot \text{м}; M_6 = -2982\text{Н} \cdot \text{м}; M_7 = -3355\text{Н} \cdot \text{м}; M_8 = -5132\text{Н} \cdot \text{м};$
 $M_9 = -6625\text{Н} \cdot \text{м}; M_{10} = -8382\text{Н} \cdot \text{м}; K_1 = 0,22\text{Н} \cdot \text{м}; K_2 = 0,22\text{Н} \cdot \text{м}; K_3 = 0,2\text{Н} \cdot \text{м};$
 $K_4 = 0,15\text{Н} \cdot \text{м}; K_5 = 0,09\text{Н} \cdot \text{м}; K_6 = 0\text{Н} \cdot \text{м}; K_7 = 0\text{Н} \cdot \text{м}; K_8 = 0\text{Н} \cdot \text{м}; K_9 = 0\text{Н} \cdot \text{м};$
 $K_{10} = 0\text{Н} \cdot \text{м}; Q_1 = 1,4\text{Н}; Q_2 = -143,5\text{Н}; Q_3 = -55,0\text{Н}; Q_4 = 68,3\text{Н}; Q_5 = 45,0\text{Н}; Q_6 = 73,5\text{Н};$
 $Q_7 = 24,2\text{Н}; Q_8 = -119,8\text{Н}; Q_9 = -118,9\text{Н}; Q_{10} = -105,3\text{Н}.$

Дослідження несучих систем напівпричепів виявило, що вони мають значні перепади та зміни жорсткості. Точний і ефективний аналіз напружено-деформованого стану таких конструкцій може бути проведений лише за допомогою модифікованого методу мінімуму потенціальної енергії деформації. На основі результатів моделювання були сформульовані рекомендації щодо оптимізації конструкції вузлів та рами, що дозволяє одночасно збільшити міцність та надійність конструкції і зменшити її матеріаломісткість.

Висновки. Проведене дослідження деформовано-напруженого стану несучої рами напівпричепів в умовах інтенсивної експлуатації переконливо підтверджує критичну важливість застосування передових методів моделювання для забезпечення їх функціональної надійності та довговічності. Застосування вдосконаленого модифікованого методу мінімуму потенціальної енергії деформації, що охоплює комплексне врахування енергій згину та кручення, у поєднанні з ефективним використанням функції Хевісайда для точного опрацювання значних перепадів жорсткостей у структурі, дозволило отримати вичерпні дані щодо поведінки конструкції під різноманітними експлуатаційними навантаженнями. Отримані результати моделювання становлять значну практичну цінність, оскільки вони надають вичерпну інформацію, необхідну для ідентифікації найбільш навантажених ділянок та

потенційних зон ризику руйнування. Це, в свою чергу, дозволяє сформувати обґрунтовані та науково вивірені рекомендації щодо подальшої оптимізації конструктивних рішень як для всієї рамної системи в цілому, так і для її окремих, найбільш критичних вузлів. Запропонований у роботі підхід сприяє не лише суттєвому підвищенню міцності та витривалості рамних конструкцій, що є життєво важливим для безпеки, а й їх раціональному та ресурсоефективному конструюванню, що безпосередньо веде до зниження матеріаломісткості кінцевих виробів. Впровадження розроблених рекомендацій у виробничу практику обіцяє значне покращення загальних експлуатаційних характеристик напівпричепів, гарантуючи їхню довговічність, максимальну безпеку руху та загальну економічну ефективність функціонування в динамічних та складних умовах сучасного транспортування.

Список літератури

1. Ковалевський С. Г., Роговий А. С. Використання комп'ютерних обчислювальних методів розрахунку напружено-деформованого стану на прикладі тягової рами напівпричепного скрепера. *Комп'ютерні технології і мехатроніка: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (Харків, 12 грудня 2019 р.). Харків: ХНАДУ, 2020. С. 63–67.
2. Джердж С., Сташків М. Я. Аналіз напружено-деформованого стану рами бурякозбирального комбайна КС-6Б-10 «ТЕРНОПІЛЬ» за допомогою ПК «ЛІРА». *Актуальні задачі сучасних технологій: тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів* (Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2017. С. 30–31.
3. Nesterenko M. M. Computer modeling of the stress-strain state of vibrating machine frames with spatial vibrations. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Полтава: НУ ім. Ю. Кондратюка, 2021. Вип. 2(57). С. 111–116. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2593>.
4. Леґецька І. П. Оцінка напружено-деформованого стану портових перевантажувальних машин. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2025. № 75. С. 30–41.
5. Fomin A., Stetsko A. Аналіз конструктивних складових вантажних вагонів для створення спрямованого напружено-деформованого стану. *Transport systems and technologies*. 2017. № 31. С. 148–159.
6. Бивалькевич Л. М., Люлька В. С. Основи надійності і довговічності транспортних машин. Чернівці, 2019. 120 с.
7. Надійність машин та обладнання: навчальний посібник. Ч. 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання / А. В. Новицький та ін. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2023. 209 с.
8. Автомобіль вантажний. Сучасні конструкції: підручник для здобувачів ступеня вищої освіти; авт. колектив: А. Т. Лебедев, В. Д. Мигаль, І. О. Шевченко, М. Л. Шуляк; за ред. проф. А. Т. Лебедева. ХНТУСГ. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 369 с.
9. Галушко М. О. Дидактичне проєктування навчального посібника «Ходова частина автомобіля»: кваліфікаційна робота магістра (015.38 Професійна освіта. Транспорт). Хмельницький: Хмельницький нац. ун-т, 2022. 121 с.
10. Будова автомобіля: навчальний посібник / А. І. Панченко, А. А. Волошина, О. В. Болтянський та ін. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2021. 247 с.
11. Рибак Т. І., Сікорський С. П., Коваль І. В., Целюк С. Г. Аналітичні залежності напружено-деформованого стану одновісних рамних конструкцій сільськогосподарських машин. *Вісник ХНТУСГ*. 2011. Вип. 112. С. 45–50.
12. Рибак Т. І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин: навчальний посібник. Тернопіль: Збруч, 2003. 332 с.
13. Rozum R. I., Buriak M. V., Zakharchuk O. P. Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Issue 18, Part 2. С. 64–67.

References

1. Kovalevskiy, S. H., & Rohovyi, A. S. (2020). Use of computer computational methods for calculating the stress-strain state on the example of a towing frame of a semi-trailer scraper. In *Komp'yuterni tekhnolohiyi i mekhatronika: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 63–67). Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
2. Dzhérdzh, S., & Stashkiv, M. Ya. (2017). Analysis of the stress-strain state of the KS-6B-10 "TERNOPIL" beet harvester frame using LIRA PC. In *Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohiy: tezy dopovidey VI mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv* (pp. 30–31). Ternopil: TNTU [in Ukrainian].

3. Nesterenko, M. M. (2021). Computer modeling of the stress-strain state of vibrating machine frames with spatial vibrations. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 111–116. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2593>
4. Lehetska, I. P. (2025). Assessment of the stress-strain state of port transshipment machines. *Visnyk Odes'koho natsional'noho mors'koho universytetu*, 75, 30–41 [in Ukrainian].
5. Fomin, A., & Stetsko, A. (2017). Analysis of structural components of freight wagons to create a directed stress-strain state. *Transport Systems and Technologies*, 31, 148–159.
6. Byvalkevych, L. M., & Liulka, V. S. (2019). Fundamentals of reliability and durability of transport machines. Chernihiv [in Ukrainian].
7. Novytskyi, A. V., et al. (2023). Reliability of machines and equipment. Part 1. Assessment and ensuring reliability of machines and equipment. Kyiv: Vydavnychyy tsentr NUBiP Ukrayiny [in Ukrainian].
8. Lebedev, A. T. (Ed.), Myhal, V. D., Shevchenko, I. O., Shuliak, M. L., & others. (2021). Cargo motor vehicle. Modern designs: Textbook for higher education. Kharkiv: TOV "Planeta-Print", KhNTUSH [in Ukrainian].
9. Halushko, M. O. (2022). Didactic design of the textbook "Automobile chassis": Master's qualification work (015.38 Professional education. Transport). Khmelnytskyi: Khmelnytskyi National University [in Ukrainian].
10. Panchenko, A. I., Voloshyna, A. A., Boltianskyi, O. V., et al. (2021). Vehicle structure: Textbook. Melitopol: VPTs "Liuks" [in Ukrainian].
11. Rybak, T. I., Sikorskyi, S. P., Koval, I. V., & Tselyuk, S. H. (2011). Analytical dependences of the stress-strain state of single-axle frame structures of agricultural machines. *Visnyk KhNTUSH*, 112, 45–50 [in Ukrainian].
12. Rybak, T. I. (2003). Search design based on optimization of the resource of mobile agricultural machines: Textbook. Ternopil: Zbruch [in Ukrainian].
13. Rozum, R. I., Buriak, M. V., & Zakharchuk, O. P. (2021). Innovative engines in the history of automobile building. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 18(2), 64–67.

Andrii Papinko¹, PhD, **Valerii Mospan²**, PhD, **Mykhailo Bashutsky¹**, **Vitaly Biryuchinsky¹**, **Oleksandr Popovych¹**

¹*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

²*Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine*

Deformed-Stressed State of Semi-Trailer Bearing Frame

This research delves into the intricate stress-strain state of semi-trailer bearing frames, a critical aspect given the escalating demands on structural integrity and longevity within contemporary transport infrastructure and intensified freight logistics. Conventional analytical design methodologies for such complex load-bearing systems frequently incorporate simplifying assumptions, which, while expediting preliminary calculations, often culminate in considerable design inaccuracies. These discrepancies are typically offset by an over-reliance on material consumption, leading to the fabrication of heavier and more costly structures than optimally necessary. This prevailing challenge underscores the imperative for advanced analytical tools that can provide a more precise and comprehensive understanding of structural behavior under real-world operating conditions, thereby mitigating the need for over-engineering and enhancing overall design efficiency.

The study employs a sophisticated methodological framework centered on a modified minimum potential energy method, meticulously tailored to analyze the intricate interplay of forces within the semi-trailer frame. A pivotal enhancement to this approach involves the explicit consideration of both bending and torsional energies, which are fundamental to accurately capturing the complex response of the frame to dynamic and static loads. Furthermore, the innovative application of Heaviside's function within the computational model significantly refines the ability to effectively process and account for abrupt changes in the structural stiffness of various frame components. This allows for a more nuanced and accurate representation of the frame's behavior, particularly in areas characterized by varying cross-sections or material properties, which are often prone to stress concentrations.

Through the rigorous application of this advanced computer modeling approach, the research aims to achieve a multifaceted optimization of the semi-trailer's frame structure and its critical nodal connections. By precisely mapping the stress and deformation distribution, the model facilitates the identification of areas requiring reinforcement or, conversely, opportunities for material reduction without compromising structural integrity. The overarching objective is to bolster the reliability and inherent durability of semi-trailers, concurrently achieving a substantial reduction in their material intensity. Ultimately, this leads to an extended service life and enhanced operational safety of semi-trailers, contributing to more sustainable and economically efficient freight transportation systems.

semi-trailers, bearing frame, stress-strain state, strain potential energy

Одержано (Received) 11.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.10.2025

УДК 629.018

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.266-273](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.266-273)**М. А. Подригало**, проф., д-р техн. наук, **А. В. Ужва**, доц., канд. техн. наук,**В. С. Шеїн**, доц., канд. техн. наук*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна**e-mail: sheinvskhadi@gmail.com*

Використання масштабного моделювання для оцінки точності вимірювання параметрів автомобілів і двигунів у нестандартних умовах

Виробництво мобільної техніки, зокрема автомобілів або двигунів неможливе без проведення випробувань дослідних зразків. З огляду на значні витрати ресурсів, зокрема – часу, на виробництво одного натурального дослідного зразка та проведення його випробувань, актуальним було та лишається випробування масштабних натурних моделей. У роботі представлені дослідження необхідної точності вимірювання фізичних величин для випадків випробувань двигунів внутрішнього згоряння на часткових швидкісних характеристиках, при форсованих випробуваннях автомобілів на надійність та при випробуваннях швидкісних автомобілів на динамічність.

випробування автомобільної техніки, форсовані випробування, часткові швидкісні характеристики, масштабне моделювання, масштабний коефіцієнт, оцінка точності вимірювань, похибка вимірювань

Постановка проблеми. Натурне (масштабне) моделювання широко використовується в різних галузях науки й техніки. Це дозволяє скоротити час проєктування та доводки машин. Науковою основою натурального масштабного моделювання є теорія подоби, методи якої дозволяють побудувати систему масштабних коефіцієнтів (масштабів), що дозволяють переводити результати з натурних масштабних випробувань до реальної машини.

Проведені раніше дослідження виявили, що для отримання адекватності натурних і масштабних результатів потрібно скорегувати вимоги до точності вимірювання параметрів різних величин під час масштабних випробувань.

Слід відзначити, що проведення випробувань автомобілів і двигунів в умовах, що різняться від стандартних, потребує корегування вимог до точності вимірювання параметрів, які досліджуються.

У статті, що розглядається, проведено дослідження необхідної точності вимірювання фізичних величин для випадків випробувань двигунів внутрішнього згоряння на часткових швидкісних характеристиках, при форсованих випробуваннях автомобілів на надійність та при випробуваннях швидкісних автомобілів на динамічність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для уникнення помилок на ранній стадії проєктування, які можуть суттєво вплинути на виробництво нових зразків техніки, застосовують методи масштабного моделювання.

Масштабне натурне моделювання знайшло широке застосування в таких галузях науки і техніки, як кораблебудування, авіабудування, галузеве та енергетичне машинобудування, автомобілебудування. В роботі [1] показано, що при конструюванні нових зразків лопатних машин проводять лабораторні дослідження на масштабних моделях лопатей: перевіряються і остаточно встановлюється форма лопатей робочого колеса та спрямовуючого апарату, визначається ККД насоса та його зміна в залежності від кількості обертів, продуктивності, напору, а також досліджується явище кавітації.

Теорія подоби чи теорія узагальнених змінних є теоретичною базою для проведення випробувань з використанням натурних моделей [2].

Практичне застосування натурального моделювання щодо руху автомобіля уперше було виконане в інституті автомобільних інженерів в Англії [3]. Дослідження полягали в оцінці впливу гальмування передніх і задніх коліс на стійкість при гальмуванні моделі автомобіля.

Використання масштабного натурального моделювання в автомобілебудуванні отримало подальший розвиток й у подальшому використовувалося О.С. Курочкіним при дослідженні механіки повороту тягача з причепом [4]. Крім того, В.М. Поляков застосовував метод масштабного моделювання при дослідженні маневреності триланкових автопоїздів [5].

Натурне моделювання використовувалося також представниками наукової школи професора В.П. Сахно [6], зокрема, П.Б. Прогній розглядав при дослідженні стійкості автомобіля у процесі гальмування [7].

Масштабне моделювання виконується з урахуванням масштабних коефіцієнтів таких параметрів (механічних величин), як лінійні розміри моделі, маса, швидкість, моменти інерції, час, коефіцієнти демпфування, жорсткості тощо. В свою чергу, побудова системи масштабних коефіцієнтів передбачає створення математичної моделі, а саме системи диференціальних рівнянь, що описує динаміку натурального об'єкту.

Прикладом може слугувати вплив пружних та демпфувальних сил на колеса автомобіля, що викликають відведення автомобіля від траєкторії в горизонтальній площині відносно центральної вертикальної осі. Такий вплив на динаміку автомобілів розглядав в своїй роботі Д.Р. Елліс [8].

Для розв'язання інваріантних задач зв'язку, що встановлюють залежності між фізичними характеристиками процесу використовується критеріальна залежність [9].

Масштабне моделювання при проведенні експериментальних досліджень автомобіля розглянуто в роботі [10]. У роботі [10] також наведено формули для розрахунку основних фізичних величин, що використовуються при випробуванні автомобілів, двигунів й інших мобільних машин (таблиця 1). У зазначеній роботі [10], також визначено вимоги до точності вимірювання фізичних величин при проведенні натурних масштабних випробувань.

Таблиця 1 – Масштаби подоби механічних величин

№ з/п	Найменування механічної величини	Розмірність	Масштаб подоби	Формула для розрахунку масштабу подоби
1	2	3	4	5
1	Лінійний розмір (характерний)	$[L]$, м	m_L	L_H / L_M
2	Час	$[t]$, с	m_t	$\sqrt{m_L}$
3	Маса	$[m]$, кг	m_M	m_L^3
4	Швидкість	$[L \cdot t^{-1}]$, м/с	m_V	$\sqrt{m_L}$
5	Сила	$[m \cdot L \cdot t^{-2}]$, Н	m_F	m_L^3
6	Потужність	$[F \cdot V]$, Вт	m_N	$m_L^{7/2}$
7	Робота (енергія)	$[N \cdot t]$, Дж	m_W	m_L^4
8	Момент інерції	$[m \cdot L^2]$, кг·м ²	m_Y	m_L^5
9	Коефіцієнт жорсткості	$[F / L]$, Н/м	m_c	m_L^2

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
10	Коефіцієнт загасання	$[F \cdot t \cdot L^{-1}]$, Н·с/м	m_β	$m_L^{5/2}$
11	Коефіцієнт відводу шин	$[F]$, Н/рад	$m_\gamma = m_\delta$	m_L^3
12	Коефіцієнт демпфування шини	$[F \cdot t]$, Нс	m_λ	$m_L^{5/2}$

Джерело: на підставі [10]

Разом із цим, у роботі не розглянуто випробування автомобілів і двигунів у нестандартних умовах та не розроблено для цих випадків вимог до точності вимірювання параметрів фізичних величин.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення вимог до точності вимірювання фізичних величин при нестандартних випробуваннях автомобілів і двигунів шляхом використання теорії подоби за рахунок побудови масштабних коефіцієнтів.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити такі завдання:

- визначити вимоги до точності вимірювання параметрів двигунів при випробуваннях на часткових швидкісних характеристиках;
- визначити вимоги до точності вимірювання параметрів при форсованих випробуваннях автомобілів та їх елементів на надійність;
- визначити вимоги до точності вимірювання при випробуваннях швидкісних автомобілів на динамічність.

Виклад основного матеріалу. Випробування автотракторних двигунів на стендах є відповідальним етапом процесу постановки на виробництво. Вірогідність отриманих характеристик двигунів залежить від точності вимірювання параметрів фізичних величин. Точність вимірювань фізичних величин безпосередньо впливає на адекватність результатів натурних та модельних випробувань. В роботі Х. Харта [11] зазначено, що вимоги до похибок вимірювань залежать від того чи може допускатися визначена похибка, чи похибка повинна бути за можливості зменшена. І це рішення буває довільним. У вимірювальній техніці існує правило [11]: «Вимірювати не так точно як можливо, а так точно, як необхідно».

Точність вимірювання описує якість вимірювань у цілому, поєднуючи поняття вірності вимірювань і прецизійності вимірювань. Поняття точності також використовується як якісна характеристика засобу вимірювання, що відображає близькість його похибки до нуля. Точність вимірювання кількісно оцінюють зворотною величиною модуля відносної похибки.

При проведенні випробувань двигунів внутрішнього згоряння на стенді визначають: максимальну ефективну потужність двигунів N_{emax} ; максимальний ефективний крутний момент M_{emax} ; ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) η_e ; частоту обертів (кутову швидкість ω_e) n_e колінчастого валу; витрати палива; тощо. Найчастіше метою випробувань на стенді є визначення характеристик ДВЗ при реалізації максимальної ефективної потужності N_{emax} .

У роботі [1] розглядалося питання визначення вимог до вимірювань фізичних величин при натурному масштабному моделюванні. Визначено, що зі зростанням лінійного масштабного коефіцієнту при фізичному моделюванні зростають вимоги до точності вимірювань. У відповідності до лінійного масштабного коефіцієнту необхідно обирати й масштабний коефіцієнти інших фізичних величин.

При випробуванні ДВЗ на часткових швидкісних характеристиках ефективна потужність, яка реалізується, менше ніж максимальна ефективна потужність N_{emax} .

Тому випробування, що проводяться на режимах, які вказано, можна розглядати як масштабне моделювання потужності.

Масштабний коефіцієнт потужності в цьому випадку можна визначити як [1]

$$m_N = \frac{N_{e\max}}{N'_{e\max}}, \quad (1)$$

де $N'_{e\max}$ – максимальна ефективна потужність двигуна на частковій швидкісній характеристиці.

Співвідношення максимально припустимих похибок при визначенні параметрів $N_{e\max}$ та $N'_{e\max}$ [1] можна визначити наступним чином:

$$\frac{\Delta N_{e\max}}{[\Delta N'_{e\max}]_{\min}} = m_N, \quad (2)$$

де $\Delta N_{e\max}$ – регламентована похибка вимірювання потужності ДВЗ на зовнішній швидкісній характеристиці;

$[\Delta N'_{e\max}]_{\min}$ – припустима похибка при вимірюванні потужності на частковій швидкісній характеристиці.

З виразу (2) визначимо

$$[N'_{e\max}]_{\min} = \frac{\Delta N_{e\max}}{m_N} = \frac{\Delta N_{e\max}}{N_{e\max}} = N'_{e\max}. \quad (3)$$

З виразу (3) робимо висновок про те, що припустимі відносні похибки вимірювань потужності на зовнішніх часткових характеристиках ДВЗ повинні дорівнювати одна одній.

У відомій роботі [1] вихідним параметром для розрахунку масштабних коефіцієнтів фізичних величин є лінійний масштабний коефіцієнт m_L . У випадку, що розглядається, лінійний масштабний коефіцієнт m_L є умовною величиною, пов'язаною з масштабними коефіцієнтами інших фізичних величин залежностями

$$m_N = m_L^{7/2}. \quad (4)$$

Визначимо масштабний коефіцієнт ефективного крутного моменту

$$m_{Me} = \frac{M_{e\max}}{M'_{e\max}} = \frac{N_{e\max}}{\omega_{e\max}} \cdot \frac{\omega'_{e\max}}{N'_{e\max}} = \frac{m_N}{m_{\omega e}}, \quad (5)$$

де $m_{\omega e}$ – масштабний коефіцієнт кутової швидкості колінчастого валу;

$M_{e\max}$; $N_{e\max}$; $\omega_{e\max}$ – параметри ДВЗ при випробуваннях на зовнішній швидкісній характеристиці;

$M'_{e\max}$; $N'_{e\max}$; $\omega'_{e\max}$ – параметри ДВЗ при випробуваннях на частковій швидкісній характеристиці.

Масштабний коефіцієнт кутової швидкості

$$m_{\omega e} = \frac{\omega_{e\max}}{\omega'_{e\max}} = \frac{V_{\max}/r}{V'_{\max}/r'} = \frac{V_{\max}}{V'_{\max}} \cdot \frac{r'}{r} = \frac{m_V}{m_L}, \quad (6)$$

де $V_{\max}$; $V'_{\max}$ – умовна лінійна швидкість;

r ; r' – умовні радіуси обертання (коефіцієнти зв'язку між лінійними та кутовими швидкостями колінчастого валу).

Вважаючи, що $m_V = \sqrt{m_L}$, перетворимо вираз (6) до вигляду

$$m_{\omega e} = \frac{\sqrt{m_L}}{m_L} = m_L^{-1/2}. \quad (7)$$

Вираз (5) з урахуванням (4) та (7) набуде вигляд

$$m_{Me} = \frac{m_N}{m_{\omega e}} = \frac{m_L^{7/2}}{m_L^{-1/2}} = m_L^4. \quad (8)$$

Вирішення рівнянь (4) та (8) дозволяє визначити взаємозв'язок між показниками m_{Me} і m_N

$$m_{Me} = m_N^{8/7} = \left(\frac{N_{e\max}}{N'_{e\max}} \right)^{\frac{8}{7}}. \quad (9)$$

За аналогією, з визначенням похибки вимірювання потужності, визначимо похибку вимірювання ефективного крутного моменту ДВЗ на часткових швидкісних характеристиках

$$\left[\Delta M'_{e\max} \right]_{\min} = \frac{\Delta M_{e\max}}{m_{Me}} = \frac{\Delta M_{e\max}}{\left(N_{e\max} / N'_{e\max} \right)^{\frac{8}{7}}}. \quad (10)$$

При визначенні вимог до точності вимірювання кутової швидкості обертання колінчастого валу масштабний коефіцієнт кутової швидкості [1]

$$m_{\omega e} = \frac{m_L}{m_V} = \frac{m_L}{\sqrt{m_L}} = m_L^{-1/2}, \quad (11)$$

де m_V – масштабний коефіцієнт лінійної швидкості.

З рівняння (11) отримаємо

$$m_L = m_{\omega e}^{-2}, \quad (12)$$

а з рівняння (4)

$$m_L = m_N^{2/7}. \quad (13)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (12) і (13) отримаємо

$$m_{\omega e} = m_N^{-1/7}. \quad (14)$$

Припустима похибка вимірювання кутової швидкості колінчастого валу

$$\left[\Delta \omega'_e \right]_{\min} = \frac{\Delta \omega_e}{m_{\omega e}} = \frac{\Delta \omega_e}{\left(m_N \right)^{-\frac{1}{7}}} = \Delta \omega_e \cdot m_N^{-1/7}. \quad (15)$$

Таким чином, аналізуючи залежності (3) і (10), можна зробити висновок про те, що перехід із зовнішньої та часткової швидкісної характеристик ДВЗ потрібно підвищувати точність вимірювання ефективних потужностей і крутного моменту. А похибка вимірювання кутової швидкості колінчастого валу може бути збільшена.

Коефіцієнт прискорення при форсованих випробуваннях (формування по навантаженню) [2] можна визначити за наступною залежністю

$$K_{np} = \left(\frac{\tau_{\phi}}{\tau} \right)^m, \quad (16)$$

де τ , τ_{ϕ} – напруга в деталі в номінальному та форсованому режимах, відповідно;

m – показник ступеню (емпіричний); складає в середньому від 6 до 12 (визначається за допомогою кривої Велера [2]).

Якщо приймати, що напруга в матеріалі пропорційна діючим моментам чи силам, то вираз (16) можна перетворити на

$$K_{np} = \left(\frac{M_{\phi}}{M} \right)^m, \quad (17)$$

де M ; M_{ϕ} – моменти, що діють в номінальному та форсованому режимах.

Враховуючи, що

$$\frac{M_{\phi}}{M} = m_M - \text{масштабний коефіцієнт моменту}, \quad (18)$$

перетворимо (17)

$$K_{np} = (m_M)^m. \quad (19)$$

Звідси отримаємо

$$m_M = K_{np}^{1/m}. \quad (20)$$

Тоді припустима похибка вимірювання при форсуванні режимів буде дорівнювати

$$[\Delta M_{\phi}]_{\min} = \frac{\Delta M}{m_M} = \frac{\Delta M}{M} \cdot M_{\phi} = \frac{\Delta M}{K_{np}^{1/m}}, \quad (21)$$

де ΔM – припустима похибка вимірювання моменту при номінальному режимі.

Аналіз виразу (21) показує, що при зростанні величини коефіцієнта прискорення при форсованих випробуваннях припустима похибка вимірювання навантаження повинна зменшуватись не залежно від фізичної величини.

Вихідним параметром для розрахунку системи масштабних коефіцієнтів і вимог до точності вимірювання фізичних величин при динамічних випробуваннях швидкісних автомобілів є масштабний коефіцієнт швидкості

$$m_V = \frac{V_{cm}}{V_{ув}} < 1, \quad (22)$$

де $V_{ув}$ – максимальна швидкість автомобіля, що випробовується;

V_{cm} – максимальна швидкість стандартного автомобіля.

Цей масштабний коефіцієнт пов'язаний з лінійним масштабним коефіцієнтом (табл. 1) залежністю

$$m_V = m_L^{1/2}. \quad (23)$$

Інші масштабні коефіцієнти (табл. 1) також пов'язані з лінійним масштабним коефіцієнтом. Прирівнюючи праві частини відповідних рівнянь одну до одної, отримаємо

$$m_t = m_V - \text{для часу}; \quad (24)$$

$$m_M = m_V^3 - \text{для маси}; \quad (25)$$

$$m_F = m_V^3 - \text{для сили}; \quad (26)$$

$$m_N = m_V^7 - \text{для потужності}; \quad (27)$$

$$m_W = m_V^8 - \text{для роботи (енергії)}. \quad (28)$$

Тоді припустимі похибки вимірювань будуть дорівнювати

$$[\Delta V_{ув}]_{\min} = \frac{\Delta V_{cm}}{m_V} = \frac{\Delta V_{cm}}{V_{cm}} \cdot V_{ув}; \quad (29)$$

$$[\Delta m_{ув}]_{\min} = \frac{\Delta m_{cm}}{m_M} = \frac{\Delta m_{cm}}{V_{cm}^3} \cdot V_{ув}^3; \quad (30)$$

$$[\Delta F_{ув}]_{\min} = \frac{\Delta F_{cm}}{m_F} = \frac{\Delta F_{cm}}{V_{cm}^3} \cdot V_{ув}^3; \quad (31)$$

$$[\Delta N_{ув}]_{\min} = \frac{\Delta N_{cm}}{m_N} = \frac{\Delta N_{cm}}{V_{cm}^7} \cdot V_{ув}^7; \quad (32)$$

$$[\Delta W_{ув}]_{\min} = \frac{\Delta W_{cm}}{m_W} = \frac{\Delta W_{cm}}{V_{cm}^8} \cdot V_{ув}^8. \quad (33)$$

Аналіз залежностей (29) – (33) показує, що зі зростанням максимальної швидкості автомобілів по відношенню до її стандартної величини при динамічних випробуваннях мінімальна припустима похибка вимірювання фізичних величин буде збільшуватись.

Висновки. 1. Перехід від зовнішньої на часткову швидкісну характеристику при проведенні випробувань ДВЗ повинен супроводжуватись підвищенням точності вимірювання ефективної потужності і крутного моменту. При цьому похибка вимірювання кутової швидкості колінчастого вала може бути збільшена.

2. При форсованих випробуваннях автомобілів, двигунів та їх елементів зі зростанням коефіцієнта прискорень найбільша припустима похибка вимірювань параметра, що вимірюється повинна зменшуватись.

3. При випробуваннях швидкісних автомобілів, зі зростанням максимальної швидкості останніх (по відношенню до стандартної величини при динамічних випробуваннях автомобілів) мінімальна припустима похибка вимірювань фізичних величин може бути збільшена.

Список літератури

1. Угинчус А. А. Гидравлика и гидравлические машины. Харків: ХГУ, 1970. 295 с.
2. Gukhman A. A. Introduction to the Theory of Similarity. London: Academic Press, 1965. 256 p.
3. Olley M. Road Manners of the Modern Car. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*. London, 1946. 41(1). С. 523–551. DOI:10.1243/PIAE_PROC_1946_041_034_02.
4. Курочкін О. С. Дослідження маневреності та стійкості автомобільного поїзда з довгобазним багатовісним напівприцепом: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 1978. 161 с.
5. Поляков В. М., Сахно В. П. Триланкові автопоїзди. Маневреність: монографія. Луганськ: Вид-во «Ноулідж», 2014. 206 с.
6. Автомобілі. Стійкість: монографія / В. Г. Вербицький, В. П. Сахно та ін. Луганськ: Ноулідж, 2013. 176 с.
7. Прогній П. Б. До аналізу стійкості автопоїзда у гальмівному режимі. *Вісник Національного транспортного університету*. 2013. Вип. 27. С. 299–305.
8. Ellis J. R. Vehicle Dynamics. London: Business Books Limited, 1969. 243 p.
9. Sedov L. I. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. London: Academic Press, 1959. 363 p. DOI:10.1016/C2013-0-08173-X.

10. Подригало М. А., Шеїн В. С. Масштабне моделювання при проведенні експериментальних досліджень автомобіля. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Науковий журнал. 2023. №1(20). С. 187–197.
11. Hans Hart. Einführung in die Messtechnik. 5. Durchgesehene Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1989. 379 s. Краснокутський В. М., Нічке В. В., Пімонов Г. Г. Якість машин: навч.-метод. посіб. Харків: ХНАДУ, 2009. 224 с.

Reference

1. Uhinchus, A. A. (1970). Hydraulics and hydraulic machines. *Kharkiv: HGU* [in Russian].
2. Gukhman, A. A. (1965). Introduction to the theory of similarity. London: Academic Press.
3. Olley, M. (1946). Road manners of the modern car. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*, 41(1), 523–551. https://doi.org/10.1243/PIAE_PROC_1946_041_034_02
4. Kurochkin, O. S. (1978). Research of maneuverability and stability of a road train with a long-wheelbase multi-axle semi-trailer: Candidate's thesis. Kyiv [in Ukrainian].
5. Polyakov, V. M., & Sakhno, V. P. (2014). Three-link road trains. Maneuverability: Monograph. *Luhansk: Vyd-vo "Noulidzh"* [in Ukrainian].
6. Verbytskyi, V. H., Sakhno, V. P., et al. (2013). Automobiles. Stability: Monograph. *Luhansk: Vyd-vo "Noulidzh"* [in Ukrainian].
7. Prohni, P. B. (2013). On the analysis of road train stability in braking mode. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 27, 299–305 [in Ukrainian].
8. Ellis, J. R. (1969). Vehicle dynamics. London: Business Books Limited.
9. Sedov, L. I. (1959). Similarity and dimensional methods in mechanics. London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-08173-X>
10. Podryhalo, M. A., Shein, V. S. (2023). Scale modelling in conducting experimental automobile research. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyi zhurnal*, 1(20), 187–197 [in Ukrainian].
11. Hans, H. (1989). Introduction to measurement technology (5th revised edition). Berlin: VEB Verlag Technik.
12. Krasnokutskyi, V. M., Nichke, V. V., & Pimonov, H. H. (2009). Machine quality: Training and methodological manual. *Kharkiv: KhNADU* [in Ukrainian].

Mykhailo Podryhalo, Prof., DSc., **Anatolii Uzhva**, Assoc. Prof., PhD, **Vitalii Shein**, Assoc. Prof., PhD
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,

Using Scale Modeling to Assess the Accuracy of Measuring Parameters of Vehicles and Engines under Non-Standard Conditions

The production of mobile technology, particularly automobiles or engines, is impossible without conducting tests on experimental samples. However, significant resource costs, notably time, for producing one natural experimental sample and conducting its tests affect both the cost price of the future series and the speed of putting the series into production. In view of this, testing of large-scale physical models was and remains relevant. The aim of the research is to determine the requirements for the accuracy of measuring physical quantities in non-standard tests of automobiles and engines by using similarity theory through the construction of scale coefficients.

The approaches adopted in the work to achieve this goal are based on methods of similarity theory, measurement methods and principles, and the theory of measurement errors. The study found that transitioning from external to partial speed characteristics when conducting engine tests should be accompanied by increased accuracy in measuring effective power and torque. In this regard, the measurement error of the crankshaft angular velocity may be increased. It was also determined that during forced tests of automobiles, engines, and their components, as the acceleration coefficient increases, the maximum permissible measurement error of the measured parameter should decrease. It was established that during tests of high-speed automobiles, as the maximum speed increases, the minimum permissible measurement error of physical quantities may be increased.

The research has been conducted on the required accuracy of measuring physical quantities for cases of testing internal combustion engines on partial speed characteristics, for accelerated reliability tests of automobiles, and for dynamic testing of high-speed automobiles. The obtained results can be recommended for testing engines on partial speed characteristics, for accelerated reliability tests of automobiles and their components, and for testing high-speed automobiles.

automotive testing, accelerated testing, partial speed characteristics, scale modeling, scale coefficient, measurement accuracy assessment, measurement error

Одержано (Received) 19.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 629.33:658.56

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.274-283](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.274-283)**А. А. Сергійчук, В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,**А. В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук, **Є. М. Козаченко***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Міжлабораторні випробування як ефективний інструмент підвищення якості діагностики технічного стану колісних транспортних засобів у системі ISO 9001

В статті представлено результати дослідження міжлабораторних випробувань як ефективного інструменту підтвердження якості діагностики технічного стану колісних транспортних засобів. Діагностика проводилась у межах сучасних систем управління якістю, побудованих відповідно до вимог стандартів ISO 9001:2015, ISO/IEC 17025:2019 та ISO/IEC 17043:2023. При цьому підвищується достовірність, стабільність та відтворюваність результатів випробувань, що виконуються на станціях технічного контролю, шляхом впровадження стандартизованої процедури міжлабораторних вимірювань.

Дослідження проведені на базі тринадцяти випробувальних дільниць підприємств ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомотодіагностика» Кіровоградської області. В якості еталонного об'єкта застосовано колісний транспортний засіб категорії N3 – DAF XF 105. У роботі детально описано всі етапи організації міжлабораторних випробувань відповідно до циклу PDCA: планування програми, уніфікація методик, калібрування вимірювального обладнання, навчання персоналу, виконання вимірювань, обробка результатів і реалізація коригувальних дій. Для аналізу узгодженості результатів використано статистичні методи згідно Стандартів ISO 13528 та ISO 5725. Здійснювали перевірку викидів бази даних за критерієм Граббса, а також визначали робастні середні значення із відповідними стандартними відхиленнями.

Отримані результати засвідчили високу повторюваність і відтворюваність вимірювань: розбіжності між дільницями міжлабораторних випробувань не перевищили 3,5 %, що свідчить про стабільність метрологічної простежуваності та належний рівень компетентності випробувальних лабораторій. Виявлені відхилення щодо димності та шуму були усунуті через калібрування обладнання та повторне інструктажне навчання персоналу, що підтвердило дієвість коригувальних заходів. Доведено, що застосування міжлабораторних випробувань підвищує довіру до результатів діагностики технічного стану колісних транспортних засобів та формує основу для впровадження регіональної бази даних контрольних вимірювань, яка може використовуватися для довгострокового моніторингу якості технічного контролю.

Запропонований підхід демонструє практичну цінність інтеграції міжлабораторних випробувань у систему управління якістю на станціях технічного обслуговування та може бути використаний як модель для побудови національної системи оцінювання компетентності випробувальних дільниць та підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні.

стандарт ISO 9001, Стандарт ISO/IEC 17025, міжлабораторні випробування, DAF, PDCA, технічний контроль, метрологічна простежуваність, якість вимірювань

Постановка проблеми. Підвищення рівня безпеки дорожнього руху вимагає впровадження сучасних методів контролю технічного стану колісних транспортних засобів (КТЗ) [1]. Надійність та стабільність результатів діагностики КТЗ залежить від кваліфікації персоналу, якості вимірювального обладнання [2] та ефективності системи управління якістю [3,4].

Відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 9001:2015 [5] і ISO/IEC 17025:2019 [6], об'єктивна оцінка точності вимірювань досягається шляхом участі у міжлабораторних випробуваннях (МЛВ), які дозволяють підтвердити технічну компетентність, узгодженість результатів та метрологічну простежуваність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологічну основу міжлабораторних випробувань і перевірки професійного рівня випробувальних підрозділів становлять міжнародні стандарти серії ISO [5-7]. Стандарт ISO/IEC 17043:2023 [8] визначає загальні вимоги до провайдерів програм перевірки професійного рівня. Він гармонізований із вимогами ISO/IEC 17025 [9] та ISO 13528 [10] і фактично задає «рамку» для побудови будь-якої системи міжлабораторних випробувань.

Спеціалізований стандарт ISO 13528:2022 [7] деталізує статистичні методи, що застосовуються під час розроблення та аналізу схем перевірки професійного рівня за допомогою міжлабораторних випробувань [11,13]. В роботах [13,14] описано підходи до встановлення призначеного значення, використання робастної статистики, розрахунку показників результативності, наведена методика виявлення викидів значень вимірювальних величин і формування висновків для учасників та органів з акредитації. Серія стандартів ISO 5725-1:2019; ISO 5725-2:2021 [6] доповнює цю базу, визначаючи поняття точності, правильності та прецизійності методів вимірювань, а також надаючи базову методику оцінювання повторюваності та відтворюваності результатів. Розглянуті стандарти [5-10,15] формують узгоджену міжнародну основу для планування, проведення та статистичної обробки міжлабораторних випробувань у будь-якій галузі, включно з технічним контролем стану КТЗ.

Практичне втілення цих підходів у сфері контролю викидів від гальмівних систем продемонстровано в циклі робіт, виконаних спільною дослідницькою групою під егідою Particle Measurement Programme (PMP). У роботі [13] проведено глобальне міжлабораторне дослідження масових викидів твердих частинок від гальмівних систем (PM) на основі уніфікованого стендового циклу WLTP-Brake [11]. Дослідження охопило 16 лабораторій у Європі, Азії та США й дозволило оцінити як повторюваність у межах окремих лабораторій, так і відтворюваність між різними установами, виявивши ключові джерела розбіжностей (втрати частинок у тракті, особливості конструкції стенда, відмінності в реалізації циклу тощо). Продовженням цієї роботи стала стаття [12], присвячена оцінюванню кількості частинок в рамках тієї ж міжлабораторної програми. Автори показали, що розкид твердих частинок за показником між лабораторіями для одного й того самого гальма досягає коефіцієнта $2,5 \pm 0,5$, що порівнянно з результатами міжлабораторних випробувань викидів із вихлопу, та сформулювали рекомендації для майбутнього глобального технічного регламенту щодо зменшення варіабельності вимірювань.

Робота [13] присвячена статистичній оцінці та температурному аналізу відтворюваності циклу WLTP-Brake у восьми випробувальних центрах Європи та США. Дослідження показало, що коректна реалізація гальмівного циклу (швидкісні режими, температурні умови, охолодження) є критичним чинником для отримання зіставних результатів між лабораторіями й безпосередньо впливає на відтворюваність, яка далі оцінюється за методологією стандартів ISO 5725 та ISO 13528.

На основі цих міжлабораторних досліджень Комітет UNECE підготував документ GRPE-87-40e про валідацію циклу WLTP-Brake через міжлабораторне дослідження точності [14], який став частиною обґрунтування нового глобального технічного регламенту (UN GTR) із лабораторного вимірювання викидів від гальмівних систем. Таким чином, праці [11-14] демонструють повний цикл: від розроблення методики, її міжлабораторної перевірки на основі ISO 17043, ISO 13528 та ISO 5725, до закріплення отриманих рішень у нормативному полі UN GTR.

Важливий приклад інтеграції міжлабораторних випробувань у систему технічного контролю дорожніх транспортних засобів на національному рівні подає

Китай. Стандарт GB/T 42685-2023 Safety Technical Inspection of Motor Vehicles [16] закріплює застосування міжлабораторних порівнянь у системі безпекових технічних оглядів КТЗ, вводячи визначення “proficiency testing” і “inter-institution comparison” як механізм порівняння результатів різних інспекційних органів на одному й тому самому КТЗ. Це фактично нормативне впровадження концепції «еталонного транспортного засобу» для перевірки узгодженості результатів техогляду між різними випробувальними дільницями, що повністю відповідає підходам ISO/IEC 17043 та ISO 13528.

На цьому тлі вітчизняні дослідження [3,4,17,18] зосереджені на побудові сучасної системи управління якістю технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів та підвищенні ефективності системи ТО й рівня безпеки експлуатації КТЗ. У роботах [3, 14,17,18] обґрунтовано доцільність впровадження процесного підходу, ризик-орієнтованого управління та застосування кількісних критеріїв оцінювання ефективності системи ТО, що створює методологічне підґрунтя для інтеграції міжлабораторних випробувань як інструмента контролю компетентності випробувальних дільниць і достовірності результатів технічного контролю. Хоча в працях [3, 4] безпосередньо не регламентовано процедури PT/ILS, але закладені підходи до побудови систем управління якістю та оцінювання результативності процесів повністю корелюють із вимогами стандартів [6,7,15] і можуть бути адаптовані для створення національної моделі міжлабораторних порівнянь у сфері обов’язкового технічного контролю.

Узагальнюючи викладене, можна зазначити, що міжнародні стандарти формують цілісну нормативно-методичну базу для організації міжлабораторних випробувань, а проаналізовані праці демонструють успішне практичне застосування цих вимог під час розроблення й валідації методик вимірювання викидів від гальмівних систем та їх подальшої регламентації у вигляді глобальних технічних регламентів. Китайський стандарт [16] засвідчує можливість прямого закріплення механізмів PT/ILS у національному законодавстві з технічного контролю КТЗ. Водночас наші дослідження [3, 4, 17, 18] формують основу для адаптації таких підходів у системі управління якістю технічного обслуговування і ремонту КТЗ, але потребують подальшого розвитку у напрямі створення цілісної моделі міжлабораторних випробувань з використанням еталонних транспортних засобів та статистичних методів для оцінювання повторюваності та відтворюваності результатів.

Постановка завдання. Метою роботи є вдосконалення системи управління якістю станцій технічного обслуговування (СТО) шляхом впровадження міжлабораторних випробувань як інструменту оцінювання стабільності результатів діагностики КТЗ.

Для реалізації поставленої мети дослідження в роботі розв’язуються наступні завдання:

1. Розробити процедуру проведення міжлабораторних випробувань відповідно до Стандарту ISO/IEC 17043.
2. Провести практичні міжлабораторні випробування на автомобіль DAF категорії N3, як еталонного транспортного засобу.
3. Оцінити узгодженість результатів між випробувальними дільницями підприємств ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомобільна діагностика».
4. Застосувати цикл PDCA для вдосконалення системи управління якістю.
5. Сформулювати пропозиції для створення регіональної бази результатів міжлабораторних випробувань транспортних засобів.

Виклад основного матеріалу. Міжлабораторні випробування проводилися у

серпні-вересні 2025 року на базі лабораторій підприємств ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомобільна діагностика», які розташовані по всій території Кіровоградської області.

До випробувань залучено тринадцять випробувальних дільниць (табл. 1).

Таблиця 1 – Перелік випробувальних дільниць і графік проведення міжлабораторних випробувань

№	Підприємство	Дата проведення	Випробувальна дільниця	Адреса проведення
1	ТОВ «Автодіагностика»	25.08.2025	Лабораторія № 7	26300, м. Гайворон, вул. Гайворонська, 1-Д
2	ТОВ «Автодіагностика»	25.08.2025	Лабораторія № 6	26400, м. Благовіщенське, вул. Промислова, 53
3	ТОВ «Автомобільна діагностика»	26.08.2025	Лабораторія № 4	26100, смт. Новоархангельськ, вул. Центральна, 111
4	ТОВ «Автомобільна діагностика»	27.08.2025	Лабораторія № 2	27100, м. Новоукраїнка, вул. Героїв-рятувальників, 23
5	ТОВ «Автомобільна діагностика»	28.08.2025	Лабораторія № 8	27200, м. Бобринець, вул. Каштанова, 2а
6	ТОВ «Автомобільна діагностика»	28.08.2025	Лабораторія № 3	28500, м. Долинська, вул. Соборності України, 70
7	ТОВ «Автодіагностика»	29.08.2025	Лабораторія № 5	27500, м. Кропивницький, вул. Лаванова, 27-А
8	ТОВ «Автомобільна діагностика»	29.08.2025	Лабораторія № 1	25030, м. Кропивницький, вул. Лаванова, 27-А
9	ТОВ «Автодіагностика»	01.09.2025	Лабораторія № 1	27406, м. Знам'янка, вул. В. Голого, 95ж
10	ТОВ «Автомобільна діагностика»	01.09.2025	Лабораторія № 6	22800, м. Олександрія, просп. Будівельників, 39Б
11	ТОВ «Автомобільна діагностика»	02.09.2025	Лабораторія № 7	27330, смт. Олександрівка, вул. Вишнева, 16г
12	ТОВ «Автодіагностика»	03.09.2025	Лабораторія № 4	27500, м. Світловодськ, вул. Єгорова, 77
13	ТОВ «Автомобільна діагностика»	04.09.2025	Лабораторія № 5	26000, м. Новомиргород, вул. Толстого, 27

Джерело: розроблено авторами

За еталонний об'єкт дослідження взято вантажний автомобіль DAF категорії N3 із дизельним двигуном.

Випробування КТЗ виконували за такими показниками:

- гальмівна сила КТЗ, Н;
- димність відпрацьованих газів автомобілів з дизелями та газодизелями, м⁻¹;
- рівень зовнішнього шуму на нерухомому КТЗ, дБА;
- сила світла фар, що працюють в режимі «ближнє світло», кд;
- сила світла фар, що працюють в режимі «дальнє світло», кд;

- силу світла протитуманних фар, кд;
- світлопропускання скла, %;
- сумарний кутовий проміжок рульового керування (сумарний люфт керма),°;
- висота рисунка протектора шини, мм;
- маса КТЗ, кг;
- маркування знаком офіційного затвердження;
- оцінка розширеної невизначеності (де застосовне) вимірювань

Для виконання досліджень застосовано методики ДСТУ 3649:2010, ISO 13528:2015, ISO/IEC 17043:2010, а також Правила ЄЕК ООН №13, №41 і №83.

Зазначений графік випробувань КТЗ (табл.1) охопив усі ключові ділянки регіону. Це дозволило забезпечити об'єктивність результатів, перевірити узгодженість між різними умовами експлуатації та оцінити реальний рівень компетентності випробувальних лабораторій.

Визначено п'ять етапів проведення міжлабораторних випробувань: планування (Plan); підготовка до проведення випробувань ТЗ; приведення вимірювань (Do); обробка отриманих результатів випробувань (Check); проведення коригувальних дій (Act).

На етапі планування визначено:

- цілі, методики, критерії прийнятності результатів ($C_v \leq 5\%$, $z\text{-score} \leq \pm 2$);
- в якості об'єкта дослідження було використано КТЗ категорії N3 сідловий тягач DAF XF 105 VIN-номер: XLRTE47MS0E723829 (рис.1).
- графік проведення випробувань на ділянках ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомобільна діагностика»;
- форму протоколу та процедури збору даних.



Рисунок 1 – Колісний транспортний засіб категорії N3 сідловий тягач DAF XF 105 VIN-номер: XLRTE47MS0E723829

Джерело: запропоновано авторами

Перед початком вимірювань здійснюється відповідна підготовка:

- калібрування гальмівних стендів, димомірів, люксметрів і шумомірів та інших приладів, за яким визначають показники вимірювань;
- навчання персоналу щодо уніфікованої методики проведення випробувань;
- перевірка умов середовища та підготовка КТЗ до проведення вимірювань.

При проведенні міжлабораторних випробувань на кожній дільниці здійснювали однакові вимірювання за попередньо узгодженими методиками перевірки КТЗ, а саме: сили гальмування; димності відпрацьованих газів; освітленості фар ТЗ; рівня шуму при різних режимах роботи двигуна КТЗ.

Результати випробувань зазначено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати випробувань на дільницях ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомотодіагностика»

Результат	Дільниці												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Гальмівна сила передньої осі лівого колеса, Н	16170	18680	21250	18730	24030	25720	14390	18030	19300	16900	23960	22870	23490
Гальмівна сила передньої осі правого колеса, Н	16270	17950	20380	16650	19320	22050	14430	17590	18300	15300	21260	19960	21890
Димність відпрацьованих газів автомобілів з дизелями та газодизелями, м ⁻¹	0,17	0,21	0,24	0,26	0,17	0,18	0,26	0,20	0,16	0,18	0,21	0,21	0,18
Рівень зовнішнього шуму на нерухомому КТЗ, дБА	95,9	96,0	96,0	92,2	90,2	95,5	90,1	92,0	90,0	94,7	94,5	94,9	96,1
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «ближнє світло» ((0,1 м вертикально униз від точки Р)), кд	8000	10000	11200	2300	5800	5800	8000	7000	9000	2400	7000	10000	11000
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «дальнє світло» (верхня), кд	16000	22800	22800	39700	23700	27000	30000	19100	27900	27900	35000	28000	34000
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «дальнє світло» (нижня), кд	9000	16300	16300	21200	12600	15400	24000	17500	17500	16000	12000	14000	20000
Сила світла лівої протитуманної фари, кд	1100	1000	1400	1500	1500	1000	1300	1200	1000	900	1500	800	900
Світлопропускання скла (лобове скло), %	76,7	75,4	75,9	74,7	73,9	72,2	74,3	75,1	75,1	72,3	73,0	71,5	74,7
Сумарний кутовий проміжок в повороті керма (сумарний люфт керма), °	8,0	8,5	8,0	12,0	12,5	7,50	10,0	10,5	9,0	10,5	9,5	11,5	8,0
Висота рисунка протектора шини переднього лівого колеса, мм	8,5	7,5	7,1	7,0	8,5	8,4	8,1	9,3	7,6	7,6	9,0	8,0	10,0
Маса КТЗ (за даними гальмівного стенду), кг	10550	10460	10260	10150	10430	10530	10120	10460	10300	10330	10430	10350	10490

Джерело: розроблено авторами

Після завершення вимірювань для визначення приписаного визначення значень і

їх невизначеності застосовано процедуру узгодження значень результатів учасників з використанням статистичних методів, описаних в ДСТУ ISO 13528:2016 та з урахуванням впливу викидів (п. В.3.1 е) додатку В ISO/IEC 17043:2023). Отриманні дані на випробувальних дільницях перевіряли на один викид за критерієм Граббса, результати розрахунків для критерію Граббса наведені у таблицю 3.

Таблиця 3 - Результати розрахунків для критерію Граббса

Показник	Статистика Граббса, $G_{\max}$	Статистика Граббса, $G_{\min}$	5% критичне значення	1% критичне значення	Квазिवикид / викид
Гальмівна сила передньої осі лівого колеса, Н	1,84	1,67	2,462	2,699	Відсутній
Гальмівна сила передньої осі правого колеса, Н	1,82	1,66	2,462	2,699	Відсутній
Димність відпрацьованих газів автомобілів з дизелями та газодизелями, м^{-1}	1,50	1,26	2,462	2,699	Відсутній
Рівень зовнішнього шуму на нерухомому КТЗ, дБА	1,05	1,52	2,462	2,699	Відсутній
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «ближнє світло» ((0,1 м вертикально униз від точки Р)), кд	1,44	1,80	2,462	2,699	Відсутній
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «дальнє світло» (верхня), кд	2,14	1,71	2,462	2,699	Відсутній
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «дальнє світло» (нижня), кд	1,80	1,83	2,462	2,699	Відсутній
Сила світла лівої протитуманної фари, кд	1,39	1,43	2,462	2,699	Відсутній
Світлопропускання скла (лобове скло), %	1,48	1,74	2,462	2,699	Відсутній
Сумарний кутовий проміжок в повороті керма (сумарний люфт керма), $^{\circ}$	1,64	1,30	2,462	2,699	Відсутній
Висота рисунка протектора шини переднього лівого колеса, мм	1,85	1,37	2,462	2,699	Відсутній
Маса КТЗ (за даними гальмівного стенду), кг	1,26	1,85	2,462	2,699	Відсутній

Джерело: розроблено авторами

В результаті перевірки на викид отриманих значень вимірювальних величин розраховано статистику Граббса для максимальних та мінімальних значень результатів випробувань параметрів КТЗ, що визначалися дільницями. Визначено, що вони є меншими за 5% критичне значення для критерію Граббса. Доведено, що випробувальні позиції є коректними і викид значень вимірювальних величин відсутній.

Виявлено, що для отриманих результатів можна використати робастний аналіз. В результаті чого проведені оцінки робастного середнього значення та робастного стандартного відхилення на основі отриманих результатів вимірювань (табл. 4).

На п'ятому етапі міжлабораторних випробувань виявлені відмінності (у димності та шумі) було усунуто шляхом калібрування приладів і повторного інструктажу персоналу.

Отримані результати МЛВ показали високу узгодженість між лабораторіями ТОВ «Автомобільна діагностика» і ТОВ «Автомобільна діагностика». Розбіжності в межах 3,5 %

підтверджують метрологічну стабільність. Застосування статистичних методів (C_v , z -score) підтвердило, що всі результати є прийнятними. Отже, МЛВ довели ефективність системи управління якістю та точність вимірювань.

Таблиця 4 - Визначення робастного середнього значення та робастного стандартного відхилення

	x^*	s^*	δ	X	S^* (нове)
Гальмівна сила передньої осі лівого колеса, Н	19300,00	4641,79	5962,69	20270,77	3997,85
Гальмівна сила передньої осі правого колеса, Н	18300,00	3010,49	4515,7	18565,38	2822,99
Димність відпрацьованих газів автомобілів з дизелями та газодизелями, m^{-1}	0,20 (0,20)	0,03 (0,03)	0,04 (0,05)	0,20	0,03
Рівень зовнішнього шуму на нерухомому КТЗ, дБА	94,70 (94,09)	1,93 (2,10)	2,89 (3,16)	94,09	2,10
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «ближнє світло» ((0,1 м вертикально униз від точки Р)), кд	8000,00 (7684,77)	2966,00 (2895,13)	4449,00 (4342,70)	7684,77	2895,13
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «дальнє світло» (верхня), кд	27900,00 (27230,77)	7563,3 (7257,77)	1344,95 (886,66)	27101,17	6972,64
Сила світла лівої фари, що працює в режимі «дальнє світло» (нижня), кд	16300,00 (16261,54)	3410,9 (3750,85)	5116,35 (5626,28)	16261,54	3750,85
Сила світла лівої протитуманної фари, кд	1100,00	296,60	444,9	1161,54	287,40
Світлопропускання скла (лобове скло), %	74,70 (74,41) (74,41) (74,41)	1,19 (1,37) (1,37) (1,37)	1,78 (2,06) (2,05) (2,05)	74,41	1,37
Сумарний кутовий проміжок в повороті керма (сумарний люфт керма), $^{\circ}$	9,50	2,22	3,34	9,65	1,89
Висота рисунка протектора шини переднього лівого колеса, мм	8,10 (8,13)	0,74 (0,85)	1,11 (1,28)	8,13	0,85
Маса КТЗ (за даними гальмівного стенду), кг	10430,00 (10385,01)	148,3 (132,83)	222,45 (199,25)	10385,01	132,83

Джерело: розроблено авторами

Впровадження моделі PDCA (Plan-Do-Check-Act) дозволило підтримувати процес безперервного вдосконалення МЛВ. Показано, що цикл моделі Plan-Do-Check-Act став основою інтеграції МЛВ у системі Стандарту ISO 9001 на СТО.

На основі результатів МЛВ проведено ряд заходів, які дають можливість підвищити якість діагностики технічного стану КТЗ: оновлено інструкції з контролю точності вимірювання параметрів технічного стану КТЗ; проведено навчання персоналу щодо вимірювання визначальних параметрів технічного стану КТЗ; розроблено щорічний графік МЛВ для дільниць випробувальних лабораторій ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомобільна діагностика»; створено базу результатів для відстеження тенденцій якості проведення робіт з діагностики на випробувальних дільницях, які приймали участь МЛВ.

Висновки. 1. Міжлабораторні випробування є дієвим інструментом підтвердження компетентності лабораторій, які проводять випробування діагностики колісних транспортних засобів, і стабільності отриманих результатів вимірювань.

2. Показано, що використання автомобіля DAF як еталонного дозволило забезпечити відтворюваність результатів між випробувальними дільницями ТОВ «Автодіагностика» та ТОВ «Автомобільна діагностика».

3. Інтеграція міжлабораторних випробувань у систему управління якістю підвищує

довіру до результатів діагностики технічного стану колісних транспортних засобів.

4. Доцільним є створення регіональної бази даних міжлабораторних випробувань для моніторингу точності вимірювань у сфері технічного контролю технічного стану колісних транспортних засобів.

Список літератури

1. Симоненко Р. В. *Підвищення ефективності експлуатації колісних транспортних засобів на основі інтелектуальних телематичних технологій* : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». Національний транспортний університет. Київ, 2021. 0521U101832.
2. Ляшук О. Л., Готович В. А., Бонар В. О., та ін. *Концепція дистанційної діагностики технічного стану транспортних засобів в процесі їх експлуатації*. Центральнотранспортний науковий вісник. Технічні науки. Збірник наукових праць. Кропивницький: ЦНТУ, 2024. Вип. 10(41), ч. 1. С. 29–39.
3. Сергійчук А. А., Гриньків А. В., Аулін В. В. *Розробка інноваційної системи управління якістю технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів на основі процесного підходу*. Зб. тез доп. XII Міжнар. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання», 20–21 лют. 2025 р., м. Київ. К.: НУБіП, 2025. С. 145–147.
4. Аулін В. В., Гриньків А. В., Сергійчук А. А., Ляшук О. Л. *Використання ймовірно-логічного діагностування технічного стану машин в розробці системи технічного обслуговування і ремонту*. Зб. тез доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання», 22–23 лют. 2024 р., м. Київ. Київ: Вид. центр НУБіП України, 2024. С. 103–105.
5. ДСТУ ISO 9001:2015. *Системи управління якістю. Вимоги*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015.
6. ISO 5725-1:2019; ISO 5725-2:2021. *Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results*. Geneva: ISO, 2019–2021.
7. ISO 13528:2022. *Statistical Methods for Use in Proficiency Testing by Interlaboratory Comparison*. Geneva: ISO, 2022. 90 p.
8. ISO/IEC 17043:2023. *Conformity Assessment. General Requirements for Proficiency Testing*. Geneva: ISO, 2023. 38 p.
9. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. *Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
10. ISO 13528:2022. *Statistical Methods for Use in Proficiency Testing by Interlaboratory Comparison*. Geneva: ISO, 2022.
11. Grigoratos T., Alemani M., Fontaras G., Martini G. *Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions — Part I: Particulate Matter Mass Emissions*. Atmosphere. 2023. Vol. 14, No. 3.
12. Mathissen M., Vogt R., Grigoratos T., Bischoff M. *Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions — Part II: Particle Number Emissions*. Atmosphere. 2023. Vol. 14, No. 3.
13. Grigoratos T., Fontaras G., Alemani M. *Statistical Assessment and Temperature Study from the Interlaboratory Application of the WLTP–Brake Cycle*. Atmosphere. 2020. Vol. 11, No. 12.
14. UNECE GRPE / WP.29. *Validation of the WLTP–Brake Cycle through an Interlaboratory Accuracy Study*. GRPE-87-40e. Geneva: UNECE, 2023.
15. ISO/IEC 17043:2023. *Conformity Assessment. General Requirements for Proficiency Testing*. Geneva: ISO, 2023.
16. GB/T 42685-2023. *Safety Technical Inspection of Motor Vehicles*. Beijing: SAC, 2023.
17. Сергійчук А. А., Аулін В. В., Гриньків А. В., Сергійчук А. В. *Забезпечення належного рівня якості надання послуг підприємствами технічного сервісу колісних транспортних засобів проведенням їх акредитації*. Центральнотранспортний науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 11(2). С. 348–363. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2025_11\(2\)_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2025_11(2)_41).
18. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Лівіцький О. М., Дьяченко В. О. *Ефективність, якість та надійність реалізації операцій в транспортно-виробничих системах*. Зб. тез доп. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання», 25–26 лют. 2021 р., м. Київ. Київ: Вид. центр НУБіП України, 2021. С. 10–14.

References

1. Symonenko, R. V. (2021). Increasing the efficiency of operation of wheeled vehicles based on intelligent telematic technologies: Doctor's thesis (05.22.20 Transport operation and repair). National Transport University, Kyiv. 0521U101832 [in Ukrainian].
2. Liashuk, O. L., Hotovych, V. A., Bonar, V. O., et al. (2024). Concept of remote diagnostics of vehicle technical condition during operation. *Tsentrlnoukrayinskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41), 29–39 [in Ukrainian].
3. Serhiichuk, A. A., Hryn'kiv, A. V., & Aulin, V. V. (2025). Development of an innovative quality management system for maintenance and repair of vehicles based on a process approach. In *Kramarovski chytannia: materialy XII mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (pp. 145–147). Kyiv: NUBiP [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Serhiichuk, A. A., & Liashuk, O. L. (2024). Use of probabilistic-logical diagnostics of machine technical condition in the development of a maintenance and repair system. In *Kramarovski chytannia: materialy XI mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (pp. 103–105). Kyiv: NUBiP [in Ukrainian].
5. DSTU ISO 9001:2015. (2015). Quality management systems. Requirements. Kyiv: UkrNDNTs [in Ukrainian].
6. ISO 5725-1:2019; ISO 5725-2:2021. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Geneva: ISO.
7. ISO 13528:2022. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. Geneva: ISO. 90 p.
8. ISO/IEC 17043:2023. Conformity assessment. General requirements for proficiency testing. Geneva: ISO. 38 p.

9. DSTU EN ISO/IEC 17025:2019. (2019). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Kyiv: DP "UkrNDNTs" [in Ukrainian].
10. ISO 13528:2022. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. Geneva: ISO.
11. Grigoratos, T., Alemani, M., Fontaras, G., & Martini, G. (2023). Interlaboratory study on brake particle emissions - Part I: Particulate matter mass emissions. *Atmosphere*, 14(3).
12. Mathissen, M., Vogt, R., Grigoratos, T., & Bischoff, M. (2023). Interlaboratory study on brake particle emissions - Part II: Particle number emissions. *Atmosphere*, 14(3).
13. Grigoratos, T., Fontaras, G., & Alemani, M. (2020). Statistical assessment and temperature study from the interlaboratory application of the WLTP-brake cycle. *Atmosphere*, 11(12).
14. UNECE GRPE / WP.29. (2023). Validation of the WLTP-brake cycle through an interlaboratory accuracy study. GRPE-87-40e. Geneva: UNECE.
15. ISO/IEC 17043:2023. Conformity assessment. General requirements for proficiency testing. Geneva: ISO.
16. GB/T 42685-2023. (2023). Safety technical inspection of motor vehicles. Beijing: SAC.
17. Serhiichuk, A. A., Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Serhiichuk, A. V. (2025). Ensuring the proper quality level of technical service enterprises for wheeled vehicles through accreditation. *Tsentralkoukrayinskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(2), 348–363. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2025_11\(2\)_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2025_11(2)_41) [in Ukrainian].
18. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Livitskyi, O. M., & Diachenko, V. O. (2021). Efficiency, quality and reliability of operational procedures in transport-production systems. In *Kramarovski chytannia: materialy VIII mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (pp. 10–14). Kyiv: Vyd. tsentr NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].

Andrii Serhiichuk, Viktor Aulin, Prof., Dr. tech. sci., **Andrii Hryn'kiv**, Sr. Researcher, PhD tech. sci.,
Yevhen Kozachenko

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Interlaboratory Testing as an Effective Tool for Improving the Quality of Diagnostics of the Technical Condition of Wheeled Vehicles in the ISO 9001 System

The article presents the results of the study of interlaboratory tests as an effective tool for confirming the quality of diagnostics of the technical condition of wheeled vehicles. Diagnostics were carried out within the framework of modern quality management systems built in accordance with the requirements of ISO 9001:2015, ISO/IEC 17025:2019 and ISO/IEC 17043:2023 standards. At the same time, the reliability, stability and reproducibility of test results performed at technical control stations are increased by implementing a standardized procedure for interlaboratory measurements.

The studies were conducted on the basis of thirteen test sites of the enterprises LLC "Avtodiagnosics" and LLC "Avtomotodiagnosics" of the Kirovograd region. A wheeled vehicle of category N3 – DAF XF 105 was used as a reference object. The paper describes in detail all stages of organizing interlaboratory tests in accordance with the PDCA cycle: program planning, unification of methods, calibration of measuring equipment, personnel training, measurement performance, processing of results and implementation of corrective actions. Statistical methods according to ISO 13528 and ISO 5725 standards were used to analyze the consistency of the results. The database emissions were checked using the Grubbs criterion, and robust average values with corresponding standard deviations were also determined. The results obtained demonstrated high repeatability and reproducibility of measurements: the discrepancies between the interlaboratory test sites did not exceed 3.5%, which indicates the stability of metrological traceability and the appropriate level of competence of the testing laboratories. The detected deviations in terms of smoke and noise were eliminated through equipment calibration and re-training of personnel, which confirmed the effectiveness of corrective measures. It is proven that the use of interlaboratory tests increases confidence in the results of diagnostics of the technical condition of wheeled vehicles and forms the basis for the implementation of a regional database of control measurements, which can be used for long-term monitoring of the quality of technical control. The proposed approach demonstrates the practical value of integrating interlaboratory tests into the quality management system at maintenance stations and can be used as a model for building a national system for assessing the competence of testing sites and improving road safety in Ukraine.

ISO 9001 Standard, ISO/IEC 17025 Standard, interlaboratory testing, DAF, PDCA, technical control, metrological traceability, measurement quality

Одержано (Received) 12.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

УДК 656.01:658.7:656.131

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.284-294](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.284-294)**С. Ю. Тищенко, 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*

Визначення елементів, які лімітують працездатність автомобілів групи Renault на основі статистичної інформації про відмови

В статті розглядається метод послідовних переваг при обробці статистичної бази експериментальних досліджень відмов елементів (вузлів, систем, агрегатів) автомобілів групи Renault. Розроблена методика реалізації методу послідовних переваг, яка має п'ять етапів. Теоретично обґрунтовано всі ці етапи на базі статистичних даних і оцінок статистичних показників. Для визначення критичних відмов елементів автомобілів і формування необхідної номенклатури запасних частин сформовані нормовані масиви даних значень бальних оцінок відмов елементів і нормовані значення питомих витрат на запасні частини. Розглянуті різні закони розподілу цих нормованих статистичних масивів. По автомобілям групи Renault сформовані рекомендації, критичні відмови яких елементів переведені в ранг запасних частин.

автомобіль, елемент, працездатність, відмова, статистична інформація, статистичні показники, запасні частини

Постановка проблеми. Виявлення відмов елементів (вузлів, систем і агрегатів) автомобілів [1-3], що лімітують їх працездатність доцільно проводити на основі статистичної інформації про їх експлуатаційну надійність [4-6]. При цьому враховуються наступні критерії: типові відмови, їх кількість на одиницю пробігу для кожної моделі автомобіля; ступені впливу типових відмов на загальну працездатність автомобілів; співвідношення об'ємів затрат S на заміну елементів і середнього напрацювання L – на відмову для даного типу відмов автомобілів [7,8].

Усі критерії реалізувалися на отриманій статистичній базі діяльності мережі надання технічного сервісу і постачання запасних частин станцій технічного обслуговування (СТО) автомобілів групи Renault. В базі статистичних даних фігурують дані по відмовам, середнього напрацювання на відмову, коефіцієнт варіації. За статистичною базою даних є також можливість визначення інтегральних і диференціальних функцій напрацювання на відмову [1,4]. Експлуатаційні показники автомобілів можливо оцінити різними методами і методиками [3]. Інтерес викликає метод послідовних переваг та методика визначення критичних елементів, які необхідно реалізувати для отриманої експериментальної бази даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні якісне функціонування автомобільних сервісних систем – СТО, логістичних центрів (ЛЦ) і складів запасних частин (ЗЧ) – потребує постійного покращення методів, спрямованих на підвищення їх ефективності [1,7,9]. Це потребує використання сучасного аналізу, оцінювання та прогнозування роботи цих систем в умовах роботи автосервісу автомобілів [10-12].

На українському ринку автосервісу є ціла низка проблем [13-15]:

- недостатня відкритість підприємств та їх фінансових даних, що значно ускладнює аналіз і розроблення рішень з оптимізації виконуваних робіт;

- відсутність необхідних методик комплексної оцінки ефективності роботи СТО та прогнозування його потреби в ЗЧ.

Для цих проблем необхідне розроблення інноваційних підходів, які будуть враховувати:

час, поточний стан ринку, що дозволить вчасно планувати потребу в ЗЧ за місцями роботи СТО та дистриб'юторів сучасних автомобілів [16-18]. Економічні рамки функціонування викликають необхідність дистриб'юторам в коригуванні методів постачання ЗЧ для підтримання працездатності транспортних засобів [19,20].

На сьогодні рівень запасів ЗЧ на СТО формують за нормативами, але більш ефективним є використання статистичних і математичних методів (теорія відновлення, масового обслуговування та ін.) [21,22].

Розв'язання цих завдань потребує експериментальних досліджень, спрямованих на:

- отримання статистичних характеристик надійності елементів (вузлів, систем, агрегатів) автомобіля та витрат на ЗЧ та їх відновлення;
- визначення закономірностей розподілу відмов та формування потоків відмов;
- оцінку значущості впливу відмов на працездатність ТЗ;
- виокремлення номенклатури ЗЧ, що лімітують працездатність легкових автомобілів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є формування і обробка статистичної інформаційної бази про експлуатаційну надійність елементів автомобілів групи Renault та визначення елементів які лімітують їх працездатність на основі уточненого методу послідовних переваг і розроблено методи його впровадження. Для реалізації мети розв'язувались наступні завдання:

1. Визначення ступеню впливу типової відмови на загальну працездатність автомобіля групи Renault.
2. Визначення ступеню впливу відмов по рівням ступеню впливу по кожному елементу автомобілів групи Renault.
3. Визначення статистичних показників зібраного масиву даних сумарних експертних оцінок.
4. Визначення масиву питомих витрат на запчастин відмовлених елементів автомобіля;
5. Відбір із вихідної множини елементів автомобіля найбільш критичних відмов і встановлення номенклатури запчастин та оцінка їх вартості.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо сутність та теоретичне обґрунтування методу послідовних переваг, який складається з п'яти етапів. На кожному з етапів з'ясовано його сутність та дано методiku визначення показників групи Renault.

1. Визначення ступеня впливу типової відмов на загальну працездатність автомобіля групи Renault. Вплив окремих елементів автомобілів на їх загальну працездатність з урахуванням критеріїв ступенів відмов виявляли таким чином:

- при впливі ступеня Q_1 відмова елемента унеможливорює експлуатацію автомобіля, тобто стан автомобіля критичний або несправний;
- при впливі ступеня Q_2 відбувається значне зниження технічної експлуатації автомобілів і такий технічний стан, що свідчить про необхідність проведення ремонту, тобто набувається несправний стан;
- при впливі ступеня Q_3 відбувається незначне відхилення параметрів технічної експлуатації автомобілів, від еталонних значень, відмову при цьому можливо трактувати як неістотне.

2. Визначення ступеню впливу відмов по рівням Q_1, Q_2, Q_3 по кожному елементу E_i у бальній оцінці та сумарний вплив відмов елементів по кожному окремому рівню Q_j :

$$\Omega_{ij} > \sum_{k=j+1}^k \Omega_{i,k}, \quad (1)$$

де i – індекс елемента автомобіля; j – показник рівня впливу відмови елементів автомобілів, $j = \overline{1, m}$; k – індекс порядкового номера елемента автомобіля, $k = (1, K)$; m – кількість рівнів відмов елементів на працездатність автомобілів ($m=3$);

n – загальне число елементів, що розглядається з позицій вимог лімітування їх працездатності;

Ω_{ij} – бальні (вагові) оцінки з точки зору чутливості даної системи, за експертним опитуванням групи спеціалістів, що мають безпосереднє відношення до підприємства автосервісу дилерської мережі СТО.

Оптимальним є наступна вимога до бальних оцінок впливу елементів на працездатність елементів:

$\Omega_{i1} = 10$; $\Omega_{i2} \cap \Omega_{i3} = \left\{ \begin{array}{l} \Omega_{i2} = 8, \Omega_{i3} = 1; \Omega_{i2} = 7, \Omega_{i3} = 2 \\ \Omega_{i2} = 6, \Omega_{i3} = 3; \Omega_{i2} = 5, \Omega_{i3} = 4 \end{array} \right\}$, згідно експертного опитування.

$$\Omega_{\Sigma_i} = \sum_{j=1}^m \Omega_{ij} . \quad (2)$$

Проводиться початкова оцінка найбільш критичних елементів E_i з точки зору забезпечення загальної працездатності автомобілів:

$$\lambda_{\Omega_i} = \left\{ \begin{array}{l} \min, \text{ для } \Omega_{\Sigma_i} \Rightarrow \max \\ \max, \text{ для } \Omega_{\Sigma_i} \Rightarrow \min \end{array} \right\} . \quad (3)$$

На масиві даних вагових оцінок $\{ \Omega_{ij} \}$ визначається оцінка математичного очікування $\overline{\Omega_i}$:

$$\overline{\Omega_i} = \frac{\sum_{j=1}^m \Omega_{ij}}{m} ; \quad (4)$$

середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma(\Omega_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\Omega_{ij} - \overline{\Omega_i})^2}{m-1}} ; \quad (5)$$

Коефіцієнт варіації:

$$\nu(\Omega_i) = \frac{\sigma_{\Omega_i}}{\overline{\Omega_i}} , \quad (6)$$

де i – індекс варіантних комбінацій бальних оцінок рівня значущості,
 m – індекс розглядуваної комбінації.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики комбінації бальних оцінок

i	$\{ \Omega_{ij} \}$	$\overline{\Omega_i}$	$\sigma(\Omega_i)$	$\nu(\Omega_i)$
1	10; 8; 1	6,33	4,726	0,746
2	10; 7; 2	6,33	4,04	0,638
3	10; 6; 3	6,33	3,512	0,555
4	10; 5; 4	6,33	3,215	0,508

Джерело: розроблено авторами

Масив бальних оцінок таблиці дозволяє проаналізувати чутливість розглянутих

комбінацій:

I: 10 – 8; 10 – 7; 10 – 6; 10 – 5;

II: 8 – 1; 7 – 2; 6 – 3; 5 – 4.

3. Визначення статистичних показників зібраного масиву даних сумарних експертних оцінок

Розглядаються наступні статистичні характеристики:

$$\text{Математичне очікування} \quad \overline{\Omega_{\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_Q} \Omega_{\Sigma_i}}{n_Q}; \quad (7)$$

$$\text{Середнє квадратичне відхилення} \quad \sigma(\Omega_{\Sigma}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Q} (\Omega_{\Sigma_i} - \overline{\Omega_{\Sigma}})^2}{n_Q - 1}}, \quad (8)$$

$$\text{де } \Omega_{\Sigma_i} = \sum_{j=1}^m \Omega_{ij}. \quad (9)$$

Формується масив $\{K_i\}$ проведенням нормування математичного очікування Ω_{Σ_i} по середньоквадратичному відхиленню $\sigma(\Omega_{\Sigma})$:

$$K_i = \frac{\Omega_{\Sigma_i}}{\sigma(\Omega_{\Sigma})}. \quad (10)$$

4. Визначення масиву, питомих витрат на запасні частини відмовлених елементів автомобілів.

Для масиву S_{Σ_i} , $i = \overline{1, n_s}$ визначаємо математичне очікування питомих витрат:

$$\overline{S_{\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} S_{\Sigma_i}}{n_s}. \quad (11)$$

Середнє квадратичне відхилення питомих витрат дорівнює:

$$\sigma(S_{\Sigma}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (S_{\Sigma_i} - \overline{S_{\Sigma}})^2}{n_s - 1}}, \quad (12)$$

де $S_{\Sigma_i} = \sum_{j=1}^m S_{ij}$. На даному етапі $n_Q = n_s$

Формуємо масив $\{M_i\}$ шляхом нормування масиву питомих затрат S_{Σ_i} :

$$M_i = \frac{S_{\Sigma_i}}{\sigma(S_{\Sigma})}. \quad (13)$$

5. Відбір із вихідної множини елементів $\{E_i\}$ автомобілів найбільш критичних відмов і встановлення номенклатури і вартості запчастин.

Проведемо оцінку варіацій $v(K)$ і $v(M)$, відповідно:

$$(K) = \sigma(K)/\overline{K}; v(M) = \sigma(M)/\overline{M}, \quad (14)$$

де математичне очікування і середньоквадратичне відхилення для $\{K_i\}$ і $\{M_i\}$

визначаються за формулами:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n_Q} K_i}{n_Q - 1}, \quad \sigma(K) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Q} (K_i - \bar{K})^2}{n_Q - 1}}; \quad (15)$$

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^{n_S} M_i}{n_S}, \quad \sigma(M) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_S} (M_i - \bar{M})^2}{n_S - 1}}. \quad (16)$$

Зазначимо, що для критичних елементів ($(M) < 0,4$) використовують порогові значення $\bar{K}_\gamma^H$ і $\bar{M}_\gamma^H$ для нормального розподілу K_i і M_i .

Якщо $v(M) \geq 0,4$ – то застосовується закон Гамма-розподілу.

Для нормального закону для K_i і M_i нижні довірчі межі визначаються наступним чином:

$$\bar{K}_\gamma^H = \bar{K} - z_\gamma \cdot \frac{\sigma(K_i)}{\sqrt{n_K}}; \quad (17)$$

$$\bar{M}_\gamma^H = \bar{M} - z_\gamma \cdot \frac{\sigma(M_i)}{\sqrt{n_M}}; \quad (18)$$

У свою чергу для Гамма-розподілу K_i і M_i нижні довірчі межі $\bar{K}_\gamma^H$ і $\bar{M}_\gamma^H$ визначаються за формулами:

$$\bar{K}_\gamma^H = \bar{K} - U_\gamma \cdot \frac{\bar{K}}{\sqrt{n_K \cdot \eta_K}}; \quad (19)$$

$$\bar{M}_\gamma^H = \bar{M} - U_\gamma \cdot \frac{\bar{M}}{\sqrt{n_M \cdot \eta_M}}. \quad (20)$$

де $\gamma \geq 0,9$, z_γ – нормована випадкова величина для ймовірності σ :

$$\eta_K = \frac{\bar{K}^2}{\sigma^2(K)}; \quad (21)$$

$$\eta_M = \frac{\bar{M}^2}{\sigma^2(M)}. \quad (22)$$

В результаті отримуємо значення нижніх довірчих меж $\bar{K}_\gamma^H$ і $\bar{M}_\gamma^H$, що дозволяє здійснити відбір номенклатури елементів, які впливають на працездатність автомобілів:

$$K_i \geq \bar{K}_\gamma^H; \quad M_i \geq \bar{M}_\gamma^H. \quad (23)$$

при цьому може виконуватись умова $n_K = n_M$, якщо $K_i \geq \bar{K}_\gamma^H$.

Працездатність автомобіля визначається за формулою:

$$R_i = K_i \cdot M_i. \quad (24)$$

Визначення нижньої довірчої границі $\bar{R}_\gamma^H$ відповідно дорівнює:

$$\bar{R}_\gamma^H = \bar{R} - U_\gamma \cdot \frac{\bar{R}}{\sqrt{n_R \cdot \eta_R}}. \quad (25)$$

З цього слідує, що η_{R_i} :

$$\eta_{R_i} = \frac{\bar{R}^2}{\sigma^2(R)}. \quad (26)$$

На прикладі автомобіля Renault Dokker наведено оцінки показників вибраних елементів.

Таблиця 2 – Оціночні показники відібраних елементів автомобіля Renault Dokker

№ п/п	Найменування елемента	Позначення елемента, E_i	Вартість ЗЧ, S_i у.о.	Середнє напрацювання на відмову, L_i т.км.	Питомі витрати на ЗЧ $S_{\text{пит}}$, у.о./1000км
1	Втулки переднього стабілізатора	E_1	5	75	0.066
2	Стійки переднього стабілізатора	E_2	20	75	0.266
3	Опора двигуна права	E_3	90	80	1.125
4	Важелі передньої підвіски	E_4	80	75	1.066
5	Сайлентблоки задньої балки	E_5	15	100	0.15
6	Гальмівні диски передні	E_6	55	90	0.61
7	Наконечники рулевих тяг	E_7	15	50	0.30
8	Рульова рейка	E_8	1000	180	5.5
9	Передні амортизатори	E_9	150	80	1.875
10	Опорні підшипники	E_{10}	60	80	0.75
11	Задні амортизатори	E_{11}	100	100	1
12	Зчеплення КПП	E_{12}	130	150	0.86
13	Стартер	E_{13}	90	200	0.45
14	Ремінь ГРМ з роликами	E_{14}	90	120	0.75
15	Ремінь полікліновий з роликами	E_{15}	60	120	0.5
16	Помпа	E_{16}	55	120	0.45
17	Турбокомпресор	E_{17}	450	250	1.8
18	Калібрування і ремонт паливних форсунок	E_{18}	400	250	1.6

Джерело: розроблено авторами

Аналогічні оціночні показники відібраних елементів приведені по автомобілям Renault Express і Renault Master.

Для відібраних елементів автомобіля Renault Dokker побудовано графіки зміни середнього напрацювання на відмову (рис. 1), розподіл вартості запчастини (рис. 2), розподіл питомих витрат по елементах автомобіля (рис.3).

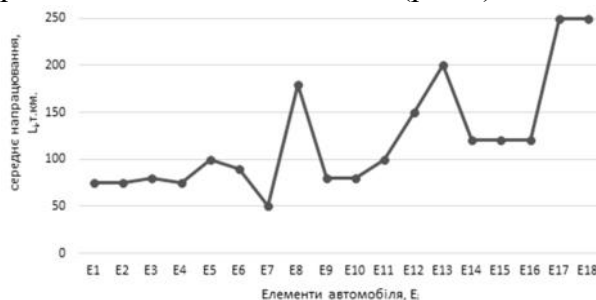


Рисунок 1 – Середнє напрацювання елементів автомобіля Renault Dokker на відмову

Джерело: розроблено авторами

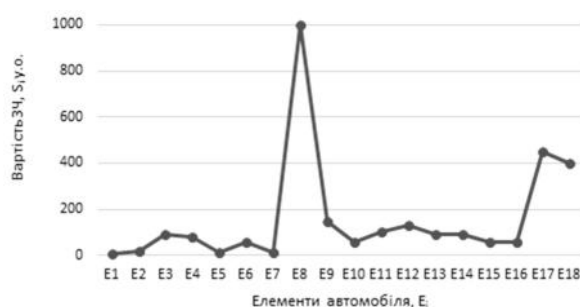


Рисунок 2 – Вартість відібраних елементів автомобіля Renault Dokker

Джерело: розроблено авторами

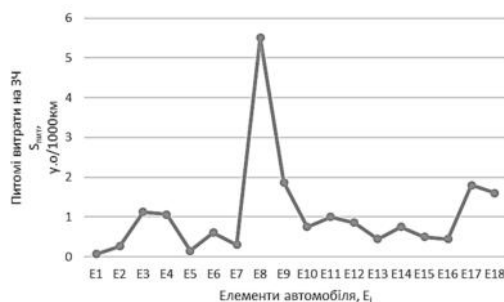


Рисунок 3 – Питомі витрати елементів що замінюються запасними частинами автомобіля Renault Dokker
Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що виділяються елементи з достатньо високим значенням цих показників. Про це свідчить і залежність вартості запасних частин від середнього напрацювання на відмову (рис. 4).



Рисунок 4 – Залежність абсолютних витрат на запасні частини від напрацювання на відмову автомобіля Renault Dokker

Джерело: розроблено авторами

По даним залежності (рис.4) побудовано рівняння регресії:

$$y = 0.1461x^4 - 4.8464x^3 + 48.61x^2 - 135.23x + 110.93; \quad R^2 = 0.258. \quad (27)$$

Аналогічно результати отримані по автомобілям Renault Express і Renault Master.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики комбінації бальних оцінок

№ п/п	Ω_{ij}	$\bar{\Omega}$	$\sigma(\Omega_i)$	$\nu(\Omega_i)$	K
1	3	3	0	0	
2	3;9	3	0	0	
3	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
4	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
5	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
6	10;6	8	2,82	0	
7	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
8	10;6	8	2,82	0	
9	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
10	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
11	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
12	10	10	0	0	
13	6;3	4,5	2,12	0,47	2,83; 1,41
14	10	10	0	0	
15	10	10	0	0	
16	10;6	8	2,82	0,47	2,83; 1,41
17	10;6	8	2,82	0,47	2,83; 1,41
18	10;6;3	6,33	3,04	0,48	3,28; 1,97; 0,98

Джерело: розроблено авторами

Використовуючи зазначену методику побудовано масив статистичних характеристик комбінації бальних оцінок (табл. 3) та виявлені елементи, які лімітують працездатність автомобіля Renault (табл.4).

Таблиця 4 – Виявлення елементів, які лімітують працездатність автомобіля Renault Dokker

№ п/п	Найменування елемента	Позначення елемента	Нормування значення бальних оцінок	Нормування масиву питомих витрат	Значимість (інтегральна) елементів	Нижня межа результуючої ознаки	Елементи лімітуючі працездатність
			K_i	M_i	R_i	$\overline{R}_\gamma^H$	E_i
1	Втулки переднього стабілізатора	E_1	0.613	0.006	0.003	0.243	
2	Стійки переднього стабілізатора	E_2	0.613	0.023	0.014		
3	Опора двигуна права	E_3	1.84	0.112	0.206		
4	Важелі передньої підвіски	E_4	1.84	0.096	0.176		
5	Сайлентблоки задньої балки	E_5	1.84	0.013	0.023		
6	Гальмівні диски передні	E_6	3.27	0.055	0.179		
7	Наконечники рулевих тяг	E_7	3.88	0.027	0.104		
8	Рульова рейка	E_8	3.88	0.495	1.920		E_8
9	Передні амортизатори	E_9	1.84	0.168	0.309		E_9
10	Опорні підшипники	E_{10}	1.84	0.067	0.123		
11	Задні амортизатори	E_{11}	1.84	0.090	0.165		
12	Зчеплення КПП	E_{12}	2.04	0.077	0.157		
13	Стартер	E_{13}	2.04	0.040	0.081		
14	Ремінь ГРМ з роликами	E_{14}	2.04	0.067	0.136		
15	Ремінь полікліновий з роликами	E_{15}	2.04	0.044	0.089		
16	Помпа	E_{16}	3.27	0.040	0.131		
17	Турбокомпресор	E_{17}	3.27	0.162	0.529		E_{17}
18	Калібрування і ремонт паливних форсунок	E_{18}	3.88	0.144	0.558		E_{18}

Джерело: розроблено авторами

Виявлено нелінійний характер залежності нормованих значень питомих витрат від нормування значень бальних оцінок. Дані нормування масивів $\{M_i\}$ і $\{K_i\}$ використано для графічної інтерпретації (рис. 5).

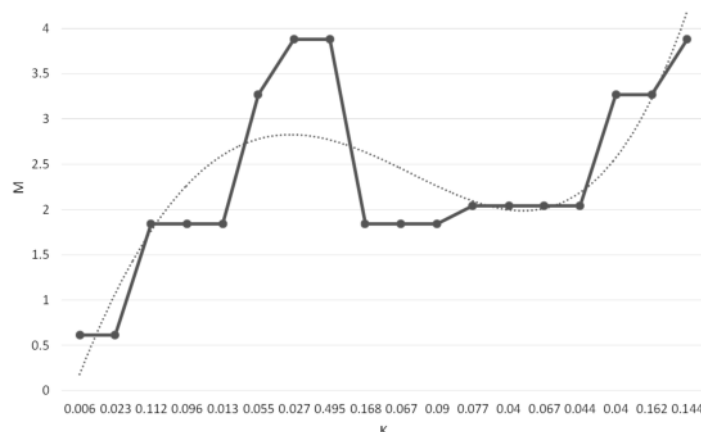


Рисунок 5 – Залежність нормованих значень питомих витрат від нормування значень бальних оцінок групи відмов елементів автомобіля групи Renault

Джерело: розроблено авторами

Отримано відповідне рівняння регресії:

$$M = 0.0001K^4 + 0.0008K^3 - 0.1082K^2 + 1.2099K - 0.9242; R=0.427. \quad (28)$$

Це рівняння свідчить про нелінійну залежність взаємозв'язку нормованих значень питомих витрат оцінок ресурсовизначальних відмов.

Висновки. 1. Теоретично обґрунтовано використання методів послідовних переваг у ресурсовизначальних відмовах елементів (вузлів, систем, агрегатів) автомобілів групи Renault. Реалізація методу складається з п'яти етапів, на кожному з яких дано його специфіку і теоретичне представлення у вигляді аналітичних виразів.

2. Показано, що для реалізації методу послідовних переваг відмов ресурсовизначальних елементів доцільно використати статистичні показники масивів отриманих даних: математичне очікування, середнє квадратичне відхилення, характерний масив $\{M_i\}$ і $\{K_i\}$ нормування бальних оцінок відмов і питомих витрат на запасні частини.

3. Розроблено методику визначення критичних елементів, використовуючи порогові значення різного типу розподілу (нормальний розподіл, Гамма-розподіл, лінійний розподіл та ін.) отриманих масивів $\{M_i\}$ і $\{K_i\}$ та їх нижні і верхні довірчі межі, працездатність автомобілів та її довірчі межі та ін.

4. На прикладі автомобілів групи Renault наведено оцінки показників вибраних елементів: вартість запасних частин, середнє напрацювання на відмову, питомі витрати на запчастини, побудовано розподіл цих показників, а також залежність вартості запчастин від середнього напрацювання на відмову. Розроблена методика дала можливість визначити елементи автомобілів групи Renault, що лімітують їх працездатність: E8, E9, E17, E18 (для автомобіля Renault Dokker). Аналогічно проведені дослідження для інших автомобілів групи Renault. Визначено доцільним ці елементи перевести в ранг запасних частин.

Список літератури

1. Тищенко С. Ю., Аулін В. В., Гриньків А. В. Виявлення типових відмов елементів автомобілів групи Renault та обґрунтування вибору запасних частин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 371–381. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.371-381](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.371-381).
2. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. [Чинний від 2011-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 28 с.
3. Аулін В.В., Ляшук О.Л., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Міронов Д.В., Слободян Л.М., Рогатинський Р.М. Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин. *Збірник наукових праць. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Вип. № 8(39), Ч. II. 2023. С. 175–189.
4. Ложачевська О. М., Григоренко Р. В. Узагальнена класифікація послуг сучасного автосервісу. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2018. Т. 29 (68), № 2. С. 31–36.

5. Damand D., Lahrichi Y., Barth M. A simulation-optimization approach to parameterize Demand-Driven Material Requirements Planning. *IFAC PapersOnLine*. 2022. Vol. 55. P. 263–268. doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.626.
6. Saccani N., Pna M., Persson F. Spare parts classification and inventory decisions: a preliminary study. 2015.
7. Аулін В. В., Ляшук О. Л., Гриньків А. В., Цьонь О. П., Гудь В. З., Головатий А. О., Тищенко С. Ю., Сергійчук А. А. Формування логістичної інформаційної системи ефективного управління транспортними і виробничими підприємствами. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч. II. С. 204–218. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.204-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.204-218)
8. Андрусенко С. І., Бугайчук О. С. Моделювання бізнес-процесів підприємства автосервісу. К.: 2014. 328 с.
9. Poliakov A., Antonyuk O., Ratsyborynskiy V. Identification of improvement ways of estimation method for nomenclature and quantity of spare parts. *Tehnomus. New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies. Journal*. 2013. № 20. P. 34–39.
10. Тищенко С. Ю., Сергійчук А. А., Аулін В. В., Гриньків А. В. Методи визначення потреб підприємств автосервісу в запасних частинах та розробка методики їх впливу на загальну працездатність автомобілів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : наук. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 243–257. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.243-257](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.243-257)*
11. Аулін В. В., Тищенко С. Ю., Гриньків А. В. Інноваційні рішення в складській логістиці. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : наук. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. Вип. 10(41), ч. 1. С. 270–285. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.270-285](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.270-285)*
12. Очеретенко С. В., Ocheretenko S., Korovko V., Zhatkanbaeva E. Особливості формування замовлень автозапчастин при багатомономенклатурному керуванні. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава : ПНТУ, 2023. Т. 2(72). С. 35–38. <http://journals.nupr.edu.ua/sunz/article/view/2952>.
13. Курніков І. П. Управління запасами автосервісів в умовах невизначеності попиту. *Автомобіліст України*. 2002. № 1. С. 15–17.
14. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Головатий А.О., Дьяченко В.О. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Technical service of agriculture, forestry and transport systems*. 2020. №22. С. 162 – 174.
15. Біліченко В. В., Антонюк О. П. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності вибору запасних частин, що зберігаються на складі АТП для підтримки в справному стані його рухомого складу. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2016. № 2. С. 56–60. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2016_2_11.
16. Очеретенко С. В. До питання про управління запасами автомобільних запчастин на торгових підприємствах. *Комуніальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2018. Вип. 142. С. 114–118. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2018_142_23.
17. Очеретенко С. В. Управління складськими запасами та їх оптимізація на підприємствах по ремонту автомобілів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Вип. 2(64). С. 50–52. DOI: doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.050.
18. Кривцун В. І., Баранов А. М. Аналіз методів визначення номенклатури та кількості запасних частин, що застосовуються для технічного обслуговування і ремонту машин інженерного озброєння. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2015. № 2. С. 36–48.
19. Кашканов А., Москалюк М. Невизначеність та її вплив на формування запасів запасних частин для забезпечення ефективності транспортних процесів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2025. Вип. 20(2). С. 74–80.
20. Кривцун В. І., Баранов А. М. Аналіз методів визначення номенклатури та кількості запасних частин, що застосовуються для технічного обслуговування і ремонту машин інженерного озброєння. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. Вип. 2. С. 36–48.
21. Bacchetti A., Saccani N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*. 2012. Vol. 40, No. 6. P. 722–737.
22. Коробочка О. М., Чернишов О. В., Трикіло А. І., Бурінчик О. О. Моделювання складських запасів на станціях технічного обслуговування автомобілів. *Математичне моделювання*. 2023. № 2(49). С. 133–141.

References

1. Tyshchenko, S. Yu., Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2025). Detection of typical failures of Renault group vehicle components and substantiation of spare parts selection. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42)(2), 371–381. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.371-381](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.371-381) [in Ukrainian].
2. DSTU 3649:2010. (2011). Wheeled vehicles. Safety requirements for technical condition and control methods. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Liashuk, O. L., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., Mironov, D. V., Slobodyan, L. M., & Rohatynskiy, R. M. (2023). Optimal set of maintenance and repair operations to improve the reliability of machine units, systems and assemblies. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39)(II), 175–189 [in Ukrainian].
4. Lozhachevska, O. M., & Hryhorenko, R. V. (2018). Generalized classification of modern auto service types. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Ekonomika i upravlinnya*, 29(68)(2), 31–36 [in Ukrainian].
5. Damand, D., Lahrichi, Y., & Barth, M. (2022). A simulation-optimization approach to parameterize demand-driven material requirements planning. *IFAC PapersOnLine*, 55, 263–268. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.626>
6. Saccani, N., Pna, M., & Persson, F. (2015). Spare parts classification and inventory decisions: A preliminary study.
7. Aulin, V. V., Liashuk, O. L., Hryn'kiv, A. V., Tsyon', O. P., Hud', V. Z., Holovatyi, A. O., Tyshchenko, S. Yu., & Serhiichuk, A. A. (2024). Formation of logistic information system for effective management of transport and

- production enterprises. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 9(40)(II), 204–218. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.204-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.204-218) [in Ukrainian]
8. Andrusenko, S. I., & Buhaichuk, O. S. (2014). Business process modeling of auto service enterprise. Kyiv [in Ukrainian].
 9. Poliakov, A., Antonyuk, O., & Ratsyborynskiy, V. (2013). Identification of improvement ways of estimation method for nomenclature and quantity of spare parts. *Tehnomus. New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, 20, 34–39.
 10. Tyshchenko, S. Yu., Serhiichuk, A. A., Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2025). Methods for determining service enterprise spare parts demand and development of methodology for their influence on vehicle operability. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42)(1), 243–257. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.243-257](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.243-257) [in Ukrainian]
 11. Aulin, V. V., Tyshchenko, S. Yu., & Hryn'kiv, A. V. (2024). Innovative solutions in warehouse logistics. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41)(1), 270–285. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.270-285](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.270-285) [in Ukrainian].
 12. Ocheretenko, S. V., Ocheretenko, S., Korovko, V., & Zhatkanbaeva, E. (2023). Features of spare parts ordering under multi-nomenclature management. *Systemy upravlinnia, navihatsiyi ta zv'yazku*, 2(72), 35–38. <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2952> [in Ukrainian]
 13. Kurnikov, I. P. (2002). Inventory management for auto service enterprises under demand uncertainty. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*, 1, 15–17 [in Ukrainian].
 14. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., Livitskiy, O. M., Holovaty, A. O., & Diachenko, V. O. (2020). Principles of construction and functioning of cyber-physical maintenance system for automotive and agricultural machinery. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. Technical Service of Agriculture, Forestry and Transport Systems*, 22, 162–174 [in Ukrainian].
 15. Bilichenko, V. V., & Antonyuk, O. P. (2016). Justification of criteria for evaluating the efficiency of spare parts selection for fleet maintenance. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 2, 56–60. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2016_2_11 [in Ukrainian].
 16. Ocheretenko, S. V. (2018). On spare parts inventory management in automotive trade enterprises. *Komunalne hospodarstvo mist. Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 142, 114–118. nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2018_142_23 [in Ukrainian].
 17. Ocheretenko, S. V. (2021). Warehouse stock management and optimization in automotive repair enterprises. *Systemy upravlinnia, navihatsiyi ta zv'yazku*, 2(64), 50–52. doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.050 [in Ukrainian]
 18. Kryvtun, V. I., & Baranov, A. M. (2015). Analysis of methods for determining spare parts nomenclature and quantity for engineering equipment maintenance. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 2, 36–48 [in Ukrainian].
 19. Kashkanov, A., & Moskaliuk, M. (2025). Uncertainty and its influence on spare parts inventory formation for effective transport processes. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 20(2), 74–80 [in Ukrainian].
 20. Kryvtun, V. I., & Baranov, A. M. (2016). Methods of determining spare parts nomenclature and quantity for engineering vehicle maintenance and repair. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 2, 36–48 [in Ukrainian].
 21. Bacchetti, A., & Sacconi, N. (2012). Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 40(6), 722–737.
 22. Korobochka, O. M., Chernyshov, O. V., Trykilo, A. I., & Burinchyk, O. O. (2023). Modelling of warehouse inventory at vehicle service stations. *Matematychni modeliuvannia*, 2(49), 133–141 [in Ukrainian].

Serhii Tyshchenko, Viktor Aulin, Prof., Dr. Tech. Sci., **Andrii Hryn'kiv**, Sr. Researcher, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Identification of Elements that Limit the Performance of Renault Group Vehicles Based on Statistical Information on Failures

The use of sequential advantage methods in resource-determining failures of elements (units, systems, units) of Renault group cars is theoretically justified. The implementation of the method consists of five stages, each of which gives its specifics and theoretical representation in the form of analytical expressions. It is shown that for the implementation of the method of sequential advantage of failures of resource-determining elements it is advisable to use statistical indicators of the obtained data arrays: mathematical expectation, mean square deviation, characteristic array $\{M_i\}$ and $\{K_i\}$ normalization of failure scores and specific costs for spare parts. A method for determining critical elements is developed using threshold values of different types of distribution (normal distribution, Gamma distribution, linear distribution, etc.) of the obtained arrays $\{M_i\}$ and $\{K_i\}$ and their lower and upper confidence limits, car performance and its confidence limits, etc. Using the example of Renault group cars, estimates of the indicators of selected elements are given: the cost of spare parts, the average time to failure, the specific costs of spare parts, the distribution of these indicators is constructed, as well as the dependence of the cost of spare parts on the average time to failure. The developed methodology made it possible to determine the elements of Renault group cars that limit their performance: E8, E9, E17, E18 (for the Renault Dokker car). Similarly, studies were conducted for other Renault group cars. It was determined that it would be appropriate to transfer these elements to the rank of spare parts.

car, element, performance, failure, statistical information, statistical indicators, spare parts

Одержано (Received) 25.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 12.12.2025

Цинь Сяосюань, Є. В. Любий, доц., канд. техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: lion_khadi@ukr.net

Теоретичні засади побудови алгоритму гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій

У статті розглядається проблематика формування матриць пасажирських кореспонденцій в рамках інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. Запропоновано метод поетапної генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій, який враховує групові та одиничні обмеження, і введено поняття потенціалу для оцінки можливості реалізації заданих обмежень. Описано алгоритм, що дозволяє уникати тупикових ситуацій у процесі моделювання матриць пасажирських кореспонденцій та забезпечує надійну реалізацію інтервального підходу до прогнозування попиту на перевезення пасажирів.

громадський транспорт, інтервальна концепція, матриця кореспонденцій, пасажирські перевезення, транспортний попит

Постановка проблеми. Формування моделей попиту на пасажирські пересування населення, з позиції вибору і використання технології їх створення, є доволі складною задачею, що полягає у необхідності точної реконструкції обсягів переміщень пасажирів між усіма парами транспортних районів (ТР) міста в умовах неповноти, неоднорідності та високої динаміки вхідних даних. Побудова таких моделей – матриць пасажирських кореспонденцій (МПК) – передбачає встановлення кількісних зв'язків між зонами походження і призначення поїздок, але головне технологічне ускладнення полягає в тому, що ці зв'язки неможливо безпосередньо спостерігати в повному обсязі – вони мають відновлюватися за допомогою різних непрямих методів, моделей і припущень [1-3].

З точки зору опису потреб населення у пересуваннях, інтервальна концепція (ІК) моделювання попиту [4] має істотні переваги перед традиційними підходами представлення МПК, оскільки дає змогу більш точно і гнучко враховувати різноманітність і варіативність поведінки пасажирів, обмежену достовірність вхідних даних та інші властивості транспортного процесу. Реальні транспортні потреби населення на пересування не є фіксованими (сталими) – вони формуються під впливом широкого кола факторів: соціально-економічного статусу, мети поїздки, сімейного стану, індивідуальних звичок, доступності транспортних альтернатив і навіть психоемоційного стану. У цьому контексті спроба представити попит у вигляді одного точного значення (стану) часто призводить до спотворень і втрати значної частини реальної поведінкової інформації.

Головною перевагою ІК моделювання попиту [4] є здатність не фіксувати попит як єдине точне значення МПК, а відображати його у вигляді інтервалу можливих станів матриць кореспонденцій (МК), що охоплює природну змінність і неточність, властиву реальним транспортним процесам. При цьому, одним із ключових, у межах інтервальної концепції, питань залишається проблема формування сукупності МК між граничними їх станами, які б створювались за умов повної випадковості та враховували обмеження, що накладаються у процесі генерації МПК [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі моделювання потреб населення на пересування системою громадського транспорту, з прив'язкою до різних об'єктів (місто, приміське сполучення, адміністративний район міста, територіальна громада) присвячено величезну кількість робіт, у яких, в основному, пропонується використання традиційних методів формування МПК – гравітаційної та/або ентропійної моделі, в класичному їх вигляді або ж із модифікаціями. Серед українських фахівців уваги заслуговує досвід науковців Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ), якими розроблено низку методів формування МПК [4-6] для різних категорій міст. Представлені методи формування МПК пройшли апробацію на низці об'єктів і підтвердили свою працездатність [7-11]. Детальний аналіз літературних джерел за обраною тематикою представлено в роботі авторів цього дослідження [3].

Стосовно питання розробки методів випадкової генерації МПК, то тут слід відзначити одну із перш спроб [12], результати якої не можуть гарантувати якісного результату за умов накладання додаткових обмежень при моделювання МК, а також дослідження авторів цієї статті [1, 2], якими на даному етапі проводиться розробка відповідної комп'ютерної програми, що базуватиметься на представлених у цій статті положеннях.

Постановка завдання. Основним, і принципово важливим для досягнення поставленої мети – створення методу гарантованої генерації випадкових матриць, проблемним питанням є забезпечення алгоритмічної можливості передбачення тупикових ситуацій, які виникають внаслідок накладання додаткових обмежень на неї. Іншим важливим питанням є забезпечення в процесі генерації максимальної випадковості значень кореспонденцій у результуючих матрицях, еталоном якої є розподіл кореспонденцій, які отримуються базовим методом подвійної генерації чергової позиції в матриці для заповнення і власне значення кореспонденції за допомогою рівномірного розподілу [1, 2]. Отже, основною задачею даного дослідження є розробка теоретичних принципів, на яких базуватиметься алгоритм гарантованої генерації випадкових МПК.

Виклад основного матеріалу. Відхід від максимальної випадковості значень кореспонденцій у методі поетапної генерації МПК обумовлений двома його властивостями. По-перше, підсумкові кореспонденції в загальному випадку є сумою рівномірно розподілених випадкових величин, а не однією такою величиною, яка отримується при використанні базового методу генерації. По-друге, за умови завчасного виявлення на деякому етапі генерації неможливості випадковим чином заповнити матрицю на наступних її етапах, виконавши при цьому всі додаткові обмеження, частина кореспонденцій має заповнюватися спрямовано (примусово), а не випадково.

Друга властивість даного методу, як це вже підкреслювалося раніше, є об'єктивною причиною, уникнути якої неможливо при намаганні досягти гарантованого результату генерації МПК за наявності додаткових обмежень. Тобто, власне поява цих обмежень вже сама по собі тягне певну втрату випадковості значень кореспонденцій внаслідок появи додаткових зв'язків між ними. Аналогічне явище в математичній статистиці відображається у врахуванні кількості ступенів свободи при визначенні критеріїв узгодження [13]. Але внаслідок складної перехресної структури цих обмежень на матричній об'єкт, які обумовлені планувальними і транспортними властивостями конкретного міста (або інших територій), аналітичний спосіб встановлення залежності між параметрами розподілу значень кореспонденцій і

кількістю додаткових обмежень на її формування, виглядає неперспективним. У цьому питанні ще не накопичений достатній обсяг знань задля формулювання аксіом, висування гіпотез і подальшої формалізації шуканих взаємозв'язків. Тому, як задача даного дослідження у цьому напрямі, приймається експериментальна оцінка впливу кількості обмежень на характеристики розподілу значень кореспонденцій, яка допоможе виявити вплив додаткових обмежень на значення кореспонденцій і створити основу для подальших досліджень властивостей моделей попиту.

Що стосується першої властивості методу поетапної генерації МПК, то вона вже не має характеру об'єктивно існуючої, оскільки породжується самим методом, і тому має бути оцінена не лише експериментально, а обов'язково аналітично, що дозволить отримати загальну характеристику даного методу для будь-яких умов його застосування. При цьому слід враховувати, що генерація випадкової матриці будь-яким методом, включаючи базовий, обтяжена деякими обмеженнями, у мінімальному випадку – місткостями ТР з відправлення і прибуття. Це приводить до того, що лише деяка частина з кореспонденцій навіть у базовому методі заповнюється вільно, без впливу на них вже заповнених значень кореспонденцій, який в основному полягає у зменшенні початкових значень місткостей після призначення попередніх кореспонденцій, що зменшує праву межу рівномірного розподілу в процесі генерації. Ця вільність є також відносною, оскільки кореспонденції обмежені початковими місткостями ТР з відправлення і прибуття, але на початку процесу генерації вони є єдиним обмеженням, що забезпечує можливість для аналітичного опису розподілу згенерованих випадкових значень кореспонденцій.

Спроба описати розподіл всіх кореспонденцій у матриці можлива при дуже обмеженій кількості ТР у моделі попиту, але заздалегідь приречений на невдачу при розгляді реальних задач, внаслідок дуже високої кількості і комбінаторній природі зв'язків між елементами матриць. З іншого боку, завдання порівняння результатів генерації матриць різними методами не супроводжується обов'язковою вимогою щодо повного охоплення всіх кореспонденцій при порівнянні. Для отримання уявлення про різницю в значеннях кореспонденцій, які виникають внаслідок застосування методу поетапної генерації замість базового методу, цілком достатнім є порівняння характеристик тих значень кореспонденцій, які спираються на лише початкові значення місткостей ТР. Цього уявлення буде достатньо для формулювання висновків щодо особливостей методу поетапної генерації і можливості його застосування при реалізації ІК моделювання попиту.

Повертаючись до основного питання гарантованої генерації МПК – забезпечення алгоритмічної можливості передбачення тупикових ситуацій, які виникають внаслідок накладання додаткових обмежень на неї, доцільно уважно проаналізувати ці обмеження. З накопиченого кафедрою транспортних систем і логістики ХНАДУ досвіду можливо зробити висновок, що на МК накладаються два види обмежень, які вже згадувалися раніше: одиничні та групові.

Без втрати загальності, перші зводяться до заборони заповнення деякої частини матриці позитивними значеннями. Виходячи з накопиченого досвіду, ці обмеження виникають при генерації рейсових МПК за результатами табличних обстежень пасажиропотоків [5]; при розгляді лише транспортних пересувань у великих територіальних об'єктах; при наявності відомих зі сторонніх джерел постійних значень частини кореспонденцій в МК. Вони є найпростішим варіантом обмежень і мають розглядатися як базові, тому при їх наявності, постійно діючі обмеження на відомі місткості ТР з відправлення і прибуття мають вважатися додатковими. Такий підхід

дозволить узагальнити характер додаткових обмежень, відносячи до них всі можливі варіанти групових обмежень, так як місткості ТР є саме такими обмеженнями.

Іншими варіантами групових обмежень є відомі для об'єкту пасажиропотоки або розподіл дальності пересувань. Різниця між ними і одиничними обмеженнями полягає в тому, що всі вони є відомою сумою деяких кореспонденцій, об'єднаних загальною ознакою, із заздалегідь відомим значенням. Тобто, місткість ТР з відправлення – це сума всіх кореспонденцій, які відправляються з даного ТР, а місткість ТР з прибуття – сума всіх кореспонденцій, які прибувають до даного ТР. Відомий за обмеженнями пасажиропотік на окремій ділянці вулично-дорожньої мережі – це сума тих кореспонденцій, які прямують через неї. Відома з функції розселення частота пересувань на деякий діапазон відстаней – це сума всіх кореспонденцій, відстань пересувань для яких потрапляє до цього діапазону (теж саме стосується і розподілу поїздок за часом пересування). Таким самим чином можливо описати і будь-які інші групові обмеження, які можуть з'являтися в конкретних випадках за умови наявності додаткових даних стосовно об'єкта дослідження. Всі вони будуть сумами окремих кореспонденцій, виділених з матриці за відповідною ознакою, оскільки інші дії при створенні матриць з кореспонденціями неможливі за їх фізичним сенсом. Звичайно, що в даному описі зроблене суттєве припущення щодо однозначної належності кореспонденцій до якогось обмеження, що на практиці може не завжди виконуватися у випадку пасажиропотоків. Але для них існує можливість об'єднання у групи пасажиропотоків з однозначним набором кореспонденцій, які прямують через відповідні ділянки, а ті випадки, для яких таке об'єднання неможливо внаслідок особливостей території або недостатнього обсягу досліджень, існує принципова можливість врахувати декілька можливих шляхів для однієї кореспонденції через відповідні часткові коефіцієнти, що можна зробити в рамках загального алгоритму.

Така властивість групових обмежень надає можливості для їх зручної алгоритмізації протягом процесу генерації, для цього необхідно виділити під кожне обмеження окремий шар, упорядкувати обмеження за деякою ознакою і створити матрицю належності кожної кореспонденції до відповідного обмеження. При цьому не обов'язково, щоб усі кореспонденції були розподілені між обмеженнями даного шару, але це важливо для алгоритму розрахунків. Тому, якщо шар обмежень охоплює не всі кореспонденції в матриці, а це може стосуватися в першу чергу пасажиропотоків, останнім обмеженням у шарі необхідно вказати фіктивний шар зі значенням обмеження, рівним сумі всіх кореспонденцій у МК. Тоді кожна кореспонденція прив'язується до якогось обмеження у шарі і на початку генерації може приймати будь-яке значення, яке не перевищує величину відповідного обмеження в даному шарі. Такі дії зі всіма шарами надають кожній кореспонденції її максимально можливе значення, яке доцільно розглядати як її потенціал у ході розрахунків. Цей потенціал є узагальненням величини правої границі рівномірного розподілу кореспонденції [1]

$$Y = \min(D_i; A_j), \quad (1)$$

де D_i – місткість ТР i з відправлення, пас.; A_j – місткість ТР j за прибуттям, пас.

Сума потенціалів кореспонденцій, які належать до конкретного обмеження надає потенціал всього обмеження, який для сумісної системи обмежень на початку розрахунків має перевищувати відому величину обмеження. Під час процесу генерації, після виконання його чергового етапу, згенеровані випадкові кореспонденції зменшують як потенціали обмежень, так і їх величини. Наближення зверху потенціалу обмеження до його величини означатиме наближення до тупикової ситуації. Якщо

потенціал обмеження дорівнює його величині, необхідно перейти від випадкової генерації до спрямованої і замінити значення кореспонденцій їх не нульовими потенціалами.

Розробка методу виконання заданих обмежень при випадковому заповненні МК базується на припущенні про те, що всі обмеження на формування матриць мають вид простої (незваженої, невиваженої – середня арифметична) суми різних наборів кореспонденцій. Цій умові відповідають усі відомі на даний момент обмеження для значень кореспонденцій, що описані у друкованих працях. Необхідною умовою для розробки шуканого методу також є принципова сумісність усіх обмежень, тобто наявність хоча б одного варіанту МК, в якому всі обмеження виконуються. Для його виконання у реальних задачах, з матрицями великих розмірів, на стадії побудови системи обмежень, може виявитися цілком достатнім відстежити, щоб не порушувалася логічна відповідність між різними умовами формування МК. Наприклад, врахування у МК заданої функції розселення навряд чи буде протирічити відомим місткостям ТР для реальної матриці дальності або часу поїздок. Однак на початку і у ході процесу заповнення МК все ж необхідно перевіряти задані обмеження на їх сумісність.

Метод послідовного заповнення матриці надає можливості для оцінювання поточного стану матриці після виконання чергового етапу заповнення. Для проведення такого оцінювання необхідно відшукати показник, що вказуватиме на те, що внаслідок випадковості вибору елементів МК, на наступному етапі заповнення матриці можуть реалізовуватися такі варіанти, котрі не дозволять у подальшому виконати всі задані обмеження. У загальному випадку, внаслідок всієї тієї ж випадковості, такі варіанти можуть реалізовуватися і безпосередньо при формуванні поточного варіанту МК, що треба вміти завчасно запобігати. Крім того, такий показник потрібен для перевірки заданих обмежень на їх сумісність, тому він повинен забезпечувати максимально широкі можливості для оцінювання перспектив заповнення МК на кожному етапі, включаючи початковий.

Можливості для виконання кожного із заданих обмежень визначаються тим, які значення можуть прийняти комірки МК, котрі формують відповідні умови. А значення цих комірок, у свою чергу, визначаються тим, які резерви для заповнення МК залишилися у кожному обмеженні. Ці резерви дорівнюють поточному значенню обмеження перед черговим етапом заповнення МК. Величина кореспонденції у комірці МК, котра заповнюється на поточному етапі, не може перевищувати жодного з обмежень, які відносяться до неї, що дозволяє визначити на кожному етапі заповнення максимально можливі значення кореспонденцій для всієї матриці. Ці максимуми, за своїм сенсом, представляють собою потенціал для заповнення комірок матриці. Сума визначених таким чином потенціалів кореспонденцій, котрі відповідають кожному обмеженню, буде представляти його потенціал, тобто можливість виконання кожного обмеження. При цьому інтерес представляє собою не стільки абсолютні потенціали, скільки їх відносні значення, оскільки вони забезпечують більшу видимість небезпеки невиконання обмежень і враховують поточне значення обмежень у знаменнику відношення.

Тому, для оцінювання станів МК, з точки зору можливості їх подальшого заповнення, для кожного обмеження доцільно ввести поняття відносного потенціалу, котрий у подальшому іменуватиметься «потенціал обмеження». У відповідності з висунутими до нього вимогами, він представляє собою відношення можливостей по

заповненню у поточному варіанті матриці тих комірок, сума яких складає відповідне обмеження, до поточного значення самого обмеження

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} p_i}{r_k}. \quad (2)$$

де P_k – потенціал k -го обмеження, $P_k \geq 0$; p_i – потенціал i -ї комірки МК, яка є елементом k -го обмеження, $p_i \geq 0$; N_k – кількість комірок МК, які є елементом k -го обмеження; r_k – резерв k -го обмеження, тобто його поточне значення перед початком чергового етапу заповнення МК.

Потенціал комірок МК, у свою чергу, визначатиметься її максимально можливою величиною, виходячи з поточних значень обмежень

$$p_i = \min(\forall r_i). \quad (3)$$

де r_i – потенціал i -го обмеження, елементом якого є i -а комірка МК.

Визначений таким чином потенціал достатньо повно характеризує можливості для заповнення МК з урахуванням заданих обмежень. При цьому його значення $P_k > 1$ означатиме, що виконання k -го обмеження можливе на наступному етапі заповнення МК. Значення $P_k = 1$, відповідатиме ситуації, коли для виконання k -го обмеження залишився лише один варіант – цілеспрямоване заповнення відповідних йому комірок з ненульовими потенціалами максимально можливими значеннями.

Менше значення потенціалу, $0 \geq P_k \geq 1$, буде означати, що на попередньому етапі заповнення, МК прийшла до такого стану, коли виконання k -го обмеження на наступних етапах заповнення стало неможливим. У цьому випадку необхідно повернутися до попереднього варіанту матриці та обрати один із двох способів усунення проблеми – або ж знову намагатися заповнити її випадковим чином, у розрахунку на те, що новий варіант заповнення МК вже не приведе до таких значень потенціалів обмежень; або ж діяти так само, як й за умови $P_k = 1$, лише з тією різницею, що заповнювати цілеспрямовано тут потрібно не всі ненульові комірки, а лише їх частину і необов'язково максимально можливими значеннями.

За умов використання першого способу процес заповнення МК може затягнутися невиправдано надовго, та й узагалі не вирішити проблему, оскільки усунення проблеми неможливості виконання одного обмеження, може привести до її появи в інших обмеженнях. А це означатиме, що поставлена задача отримання гарантованого результату при випадковому заповненні МК може не мати рішення в якомусь конкретному випадку.

Другий спосіб приводить до певної втрати випадковості у результатах заповнення, котра буде тим більша, чим частіше він буде застосовуватися. І хоча за обґрунтованих обмежень ця ситуація і є цілком об'єктивною, оскільки елементи МК пов'язані між собою різносторонніми зв'язками, котрі обумовлені діючими обмеженнями, при значенні $P_k > 1$ цілеспрямоване заповнення комірок принципово може бути виконано тільки із застосуванням деякої стратегії їх вибору. Ця проблема не виникає при $P_k = 1$, оскільки тоді існує лише один варіант заповнення, але сподіватися на точне потрапляння потенціалу в 1 у випадковому процесі не приходить. А в міру віддалення від нього, втрати випадковості ставатимуть дедалі більшими. При цьому можливо підвищити ступінь випадковості результатів заповнення МК, шляхом

використання генерації випадкових чисел при виборі потенційних елементів на етапі цілеспрямованого заповнення матриці.

Повний варіант може приводити до помітного збільшення тривалості розрахунків, що особливо проблемним буде у випадку матриць великої розмірності. Тому в алгоритмі, що описується, доцільно використовувати певні проміжні варіанти цілеспрямованого заповнення матриці, у котрих випадковим може бути не весь процес перебору комірок у заповнюваних рядку або стовпчику матриці, або інших наборів елементів МК, що відповідають заданій системі обмежень. Це може бути, наприклад, точка входу в них, з подальшим упорядкованим перебором усіх комірок у розглянутому фрагменті матриці.

У зв'язку з усім вищесказаним, алгоритм випадкового заповнення матриці повинен передбачати встановлення певного граничного (максимального) значення для потенціалів обмежень $\Pi_{\max} > 1$, за якого використовується варіант цілеспрямованого виконання проблемного обмеження. При перевищенні потенціалом цього значення, тобто коли $\Pi_k > \Pi_{\max}$, перевагу слід віддавати повторному випадковому заповненню МК на проблемному етапі, однак при цьому необхідно встановлювати обмеження на кількість повторних спроб заповнення МК для того, щоб зробити процес обчислення кінцевим і перейти до цілеспрямованого заповнення комірок. Передбачити на цьому, попередньому, етапі раціональні значення обох параметрів ($\Pi_{\max}$ і кількості ітерацій на якомусь етапі послідовного заповнення МК) не представляється можливим, тому визначати їх доцільно вже за допомогою експерименту з формування реальних МК, з використанням системи об'єктивних і сумісних обмежень, заснованих на реальних закономірностях транспортного процесу в об'єкті моделювання попиту.

Ще одним важливим керуючим параметром у випадковому процесі заповнення МК є обмеження на максимальну величину кореспонденції, яка назначається на черговому етапі. Чим вище її значення, тим більші зміни відбуваються на кожному етапі заповнення, що найістотнішим чином відбивається на ступені зменшення потенціалів обмежень. Тобто передбачити можливість виникнення ситуацій з неповним заповненням МК гіпотетично стає помітно складніше. З другого боку, підвищення обмеження на значення кореспонденції буде приводити до зростання кількості кореспонденцій з великими значеннями, тобто впливати на їхній розподіл, як основну характеристику випадкової величини. Тому вибір конкретного обмеження у процесі заповнення матриці повинен спиратися на міркування відносно найбільш прийнятного закону розподілу кореспонденцій у МК, виходячи із мети ІК моделювання попиту, котра полягає у забезпеченні максимальної різноманітності випадкових матриць, що генеруються, при виконанні усіх відомих проєктувальнику обмежень на МК. Облік відповідних змін у самому процесі заповнення матриці з точки зору ймовірності появи незакінчених процедур формування МК є вторинним, і повинен просто фіксуватися як факт у ході експериментальних досліджень.

Загалом, введення потенціалів обмежень у розрахунок випадкової МК вже на даному етапі дозволяє зробити попередній висновок про те, що повністю уникнути проблем, які виникають при випадковому заповненні реальних МК з багатовимірною системою обмежень, навряд чи вдасться. Це обумовлено великою кількістю зв'язків між її елементами, котрі реалізуються через встановлені обмеження так, що навіть несумісність обмежень складно діагностувати на початковому етапі моделювання. І чим більше обмежень накладається на МК, тим більш складною стає структура зв'язків між ними, яка визначає значення і швидкість зміни потенціалів. Більш повна формалізація цих процесів, можливо, спроститься після розробки і практичного використання алгоритму послідовного формування випадкової МК, котрий буде

забезпечувати проєктувальника ранньою діагностикою виникаючих у цьому процесі питань і пропонувати відповідні інструменти для їхнього рішення. Однак у даному дослідженні достатнім є створення працюючого механізму випадкового заповнення МК і виробка за допомогою експерименту рекомендацій по раціональним значенням параметрів, керуючих цим процесом. Задача подальшого дослідження потенціалів обмежень і формалізації процесу їх зміни у ході заповнення МК є перспективним варіантом розвитку досліджень у рамках ІК моделювання транспортного попиту.

Висновки. Введення поняття потенціалу для кореспонденції і групових обмежень дозволить передбачити можливість виникнення тупикових ситуацій при генерації випадкових матриць і досягти шуканої мети – безперешкодної реалізації ІК моделювання транспортного попиту.

Розроблена на представлених положеннях комп'ютерна програма гарантованої генерації випадкових МПК повинна стати підґрунтям для експериментального оцінювання працездатності розробленого алгоритму моделювання станів транспортного попиту на пересування пасажирів у рамках застосування ІК моделювання потреб у пересуваннях з урахуванням накладання можливих обмежень.

Список літератури

1. Любий Є.В., Ковцур К.Г., Цинь Сяосюань Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2(23) (2024). С. 152-158. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>.
2. Цинь С., Любий Є.В. Теоретичне обґрунтування результатів генерації матриць пасажирських кореспонденцій випадковим методом. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2025. № 1(24), 438-446. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1751>.
3. Цинь С., Любий Є.В. Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 2025. № 11(42), Частина 2, 394-409. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409).
4. Горбачов П.Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.01. Харків, 2009. 370 с.
5. Гончаренко С.Ю. Визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в середніх містах : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2015. 182 с.
6. Любий Є.В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Х., 2012. 22 с.
7. Аналіз діючої транспортної мережі м. Конотоп. Проведення обстеження пасажиропотоків. Обробка матеріалів обстеження пасажиропотоків по маршрутах. Розробка заходів щодо оптимізації транспортної мережі м. Конотоп: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0121U112782. Харків, 2021. 124 с.
8. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.
9. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі міста Кіровоград: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0112U00692. Харків, 2012. 115 с.
10. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі м. Олександрія : звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0113U005179. Харків, 2013. 130 с.
11. Моделювання та аналіз маршрутної мережі громадського транспорту міста Нікополя: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0115U004775. Харків, 2015. 197 с.
12. Івахнік В.С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник ВПІ*. 2022. 6 (2022). С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.
13. Neumann C., Schomaker M., Shalabh Introduction to Statistics and Data Analysis: With Exercises, Solutions and Applications in R. Springer. 2023, 584 P.

References

1. Liubiy, Ye., Kovtsur, K., & Qin, X. (2024). Formulation of the problem of random completion of the OD-matrix. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2(23), 152-158. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>
2. Qin, X., & Liubiy, Ye. (2025). Theoretical justification of the results of passenger correspondence matrix generation using a random method. *Advances in mechanical engineering and transport*. 1(24), 438-446. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1751>.

3. Qin, X., & Liubiyi, Ye. (2025). Analysis of existing methods of forming models of passenger travel needs. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 11(42), Part 2, 394-409. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409)
4. Horbachov, P.F. (2009). The concept of forming passenger transport systems in cities. Doctor's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
5. Honcharenko, S.Yu. (2015). *The demand determining for passenger route transport service in the middle cities*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
6. Liubiyi, Ye.V. (2012). *Trip demand determination of small towns' population for route passenger transportation*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
7. R&D report 0121U112782. (2021). *Analysis of the existing transport network of Konotop. Conducting a passenger flow survey. Processing of passenger flow survey materials by routes. Development of measures to optimize the transport network of Konotop city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
8. R&D report 0117U006848. (2018). *Development of a comprehensive traffic scheme for the Lutsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
9. R&D report 0112U00692. (2012). *Development of a rational variant of the route network in Kirovograd city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
10. R&D report 0113U005179. (2013). *Development of a rational variant of the route network in Oleksandriia city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
11. R&D report 0115U004775. (2015). *Modeling and analysis of the public transport route network in Nikopol city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
12. Ivakhnik, V.S. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modelling. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6 (2022), 57–64. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>
13. Heumann, C., Schomaker, M., Shalabh (2023). *Introduction to Statistics and Data Analysis: With Exercises, Solutions and Applications in R*. Springer.

Xiaoxuan Qin, Yevhen Liubiyi, Assoc. Prof., PhD in Engineering
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Theoretical Foundations for the Development of an Algorithm for Guaranteed Generation of Random Passenger Correspondence Matrices

This article is devoted to solving the complex problem of constructing models of passenger travel demand. Given the incomplete, heterogeneous, and variable nature of the available input data, it proposes the use of an interval-based concept for demand modeling. This approach allows for the incorporation of uncertainty, behavioral variability among passengers, and the inherent dynamism of real-world transport processes more accurately and flexibly than traditional methods.

The study focuses particularly on the step-by-step generation of random passenger correspondence matrices under a system of constraints. These constraints may include both individual limitations – such as the prohibition of specific matrix entries – and grouped constraints, such as known total flows between specific transport zones, capacity limits for departure and arrival zones, or other aggregate traffic indicators derived from observations or planning requirements.

To enable consistent generation of such matrices while ensuring compliance with all imposed constraints, the concept of potential is introduced. This concept defines the maximum allowable value that each cell in the correspondence matrix may take at a given stage of the generation process, considering the remaining reserves of each constraint. The article details the structure and logic of the proposed algorithm, which ensures both randomness in matrix generation and strict adherence to the constraints.

The algorithm includes mechanisms for detecting and avoiding deadlock situations that occur when further random filling of the matrix becomes impossible due to conflicting constraints. To address such cases, a filling strategy guided by the computed potentials is developed, enabling the matrix to be completed without violating the model's consistency.

This methodological framework is intended for implementation in a computer-based system that supports transportation planning by generating realistic and diverse sets of passenger correspondence matrices. The results of this research provide both a conceptual and practical foundation for the further formalization of interval-based travel demand models and for enhancing the methods used in the planning and design of urban transportation systems.

public transport, interval concept, correspondence matrix, passenger transportation, transport demand

Одержано (Received) 05.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025

УДК 629.114.2

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.304-312](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.304-312)**О. П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **У. М. Плекан**, канд. екон. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: kaf_am@ukr.net*

Оцінка споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів

Досліджено систему показників, що комплексно характеризують споживчі властивості вантажних автотранспортних засобів, як ключового елементу ефективності транспортних процесів і конкурентоспроможності автотранспортних підприємств. Проаналізовано сучасні підходи до оцінювання якості та придатності вантажних автомобілів для виконання транспортних операцій різного типу, враховуючи тенденції розвитку автомобільної техніки, зокрема електрифікацію, підвищення рівня екологічності та цифровізацію систем керування. Узагальнено підходи до класифікації споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів із виділенням основних груп чинників: техніко-експлуатаційних, що визначають надійність, продуктивність і паливну ефективність; економічних, які охоплюють повну вартість володіння, витрати на технічне обслуговування, ремонт і енергоносії; ергономічних, що відображають комфорт, безпеку та зручність роботи водія; та екологічних, пов'язаних із рівнем шкідливих викидів, шуму та впливу на довкілля. Запропоновано деталізований перелік інтегральних і локальних показників, що можуть бути використані для порівняльної оцінки різних моделей вантажних автомобілів з урахуванням умов експлуатації, типу маршрутів, дорожнього покриття, кліматичних характеристик регіону та специфічних потреб споживачів.

вантажні автомобілі, споживчі властивості, експлуатаційні характеристики, оцінка, ефективність

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючих вимог до ефективності логістичних процесів, економічності перевезень і екологічної безпеки транспорту особливого значення набуває обґрунтований вибір вантажних автотранспортних засобів. При цьому ключову роль відіграють їхні споживчі властивості, які визначають придатність автомобіля до виконання конкретних виробничих завдань з урахуванням умов експлуатації. Однак на практиці оцінювання таких властивостей нерідко є фрагментарним, суб'єктивним або не враховує усі релевантні чинники. Відсутність уніфікованої системи показників і методів порівняння ускладнює процес прийняття управлінських рішень щодо вибору, оновлення чи оптимізації парку вантажних автомобілів. Це зумовлює потребу у формуванні чіткої класифікації споживчих властивостей, виділенні основних оціночних показників та розробленні інструментарію для їхнього комплексного аналізу.

У численних працях вітчизняних та зарубіжних науковців проаналізовано як сутність споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів, так і безпосередній вплив на функціональність автомобіля. Разом з тим, досі недостатньо висвітленим залишається питання взаємного впливу показників споживчих властивостей на загальну ефективність транспорту. Формування комплексної методики оцінки споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів потребує подальшого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми та перспективи розвитку споживчих властивостей транспортних засобів отримують відображення у численних працях науковців. Так, М. В. Буряк підкреслює зв'язок між споживчими властивостями та конструктивною надійністю ТЗ, розглядає методи аналізу довговічності вузлів та агрегатів як критичного критерію для вантажного транспорту [1]. І. І. Грицук, В. В. Волков та В. В. Оніщук розглядали основні чинники, що впливають на витрату

пального, серед яких — конфігурація маршруту, швидкісний режим та завантаження [2]. В. С. Наумов та О. В. Чернуха досліджували ефективність використання вантажних автомобілів з урахуванням екологічних показників. Вчені запропонували багатокритеріальну оцінку ефективності, що враховує як економічні, так і екологічні складові; запроваджено показник, який дозволяє порівнювати ефективність при різному рівні екологічних втрат [3]. В. І. Хаврук досліджував вплив техніко-експлуатаційних властивостей вантажних автомобілів на показники ефективності експлуатації. Особливу увагу приділено залежності між вантажопідйомністю та річним пробігом [4]. Анджей Дмовський з співавторами досліджували експертну та емпіричну оцінки експлуатаційної якості вантажних автомобілів [5]. Науковці з Фінляндії Тарік Хассан і Пекка Хеловнесли вклад в аналіз вибору техніки та вимірників продуктивності [6]. Хамід Саїді, Барт Вігманс та Бехруз Бехдані розглянули методології оцінювання ефективності вантажоперевезень, включаючи показники, які можуть бути адаптовані до споживчих властивостей вантажних автомобілів [7]. В. Сахно розроблено математичну модель автопоїзда для дволанкового метробуса [8]. Т. Солакві Л. Ояла аналізували економічний та екологічний потенціал важких конфігурацій вантажних автомобілів (паливну ефективність, викиди, завантаження) [9]. Мортеза Тайебат, Остін Л. Браун та ін. систематизували наслідки впровадження автоматизованих і підключених транспортних засобів, включаючи вантажні, для енергетичної ефективності та екологічної сталості [10].

Проте за сучасних умов є необхідність дослідження взаємозв'язків показників споживчих властивостей вантажних автотransпортних засобів та удосконалення методики оцінки споживчих властивостей вантажних автотransпортних засобів.

Постановка завдання. Метою дослідження є удосконалення методичного підходу до порівняльної оцінки споживчих властивостей вантажних автотransпортних засобів. Мета дослідження обумовила виконання таких завдань: систематизувати критерії оцінювання споживчих властивостей вантажних автотransпортних засобів; дослідити взаємозв'язки показників споживчих властивостей вантажних автотransпортних засобів; запропонувати структуру методики для оцінки споживчих властивостей вантажних автотransпортних засобів;

Виклад основного матеріалу. Розвиток транспортної галузі в умовах глобалізації, урбанізації та посилення вимог до екологічної безпеки зумовлює підвищення вимог до якості вантажних автотransпортних засобів (ВАТЗ). У сучасних умовах ринок вимагає від вантажної техніки не лише високої надійності та економічності, а й відповідності широкому спектру критеріїв, які визначають її споживчу привабливість. При цьому оцінка споживчих властивостей виступає як ключовий інструмент оптимізації транспортного парку, раціонального вибору техніки та прогнозування ефективності її експлуатації.

Оцінка споживчих властивостей ВАТЗ є актуальною задачею для підприємств, які здійснюють вантажні перевезення, оскільки вибір транспортного засобу впливає на ефективність логістичних операцій, собівартість перевезень та конкурентоспроможність автотransпортного підприємства. Інтегральна оцінка визначається як зважена сума нормованих показників:

$$I_{\text{спож}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot K_i, \quad (1)$$

де: $I_{\text{спож}}$ — інтегральний індекс споживчих властивостей ВАТЗ; K_i — нормоване значення i -го показника (після приведення до безрозмірного вигляду); w_i — ваговий коефіцієнт важливості i -го показника ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$); n — кількість показників у системі оцінювання.

Значення $I_{\text{спож}}$ є узагальненим показником, який дозволяє визначити рівень відповідності вантажного автотранспортного засобу вимогам споживача та умовам експлуатації. Чим вищим є інтегральний індекс, тим більш збалансованими є техніко-експлуатаційні, економічні, ергономічні та екологічні характеристики транспортного засобу.

Для забезпечення коректності оцінювання кожен показник K_i підлягає нормалізації, що здійснюється залежно від типу показника:

- для показників вирашного типу - за формулою:

$$K_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2)$$

- для показників витратного типу:

$$K_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (3)$$

де X_i — фактичне значення i -го показника, $X_{\min}$ і $X_{\max}$ — мінімальне та максимальне значення відповідного показника серед аналізованих альтернатив.

Після нормалізації всі показники набувають значень у межах $[0; 1]$, що забезпечує їх порівнюваність і дозволяє агрегувати результати в єдиний інтегральний індекс.

Таким чином, розроблена система формалізує процес оцінювання споживчих властивостей БАТЗ, забезпечує прозорість прийняття рішень і може бути використана як основа для створення рейтингових моделей вибору транспортних засобів у межах автотранспортних підприємств, логістичних компаній або на рівні державних закупівель.

Споживчі властивості БАТЗ доцільно оцінювати за групами показників, зазначеними на рисунку 1.



Рисунок 1 - Показники споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів

Джерело: розроблено авторами

Детальніше проаналізуємо структуру запропонованих груп показників.

1. *Техніко-експлуатаційні показники.* Група включає параметри, що безпосередньо впливають на функціональність автомобіля. Техніко-експлуатаційні показники вантажних автотранспортних засобів (БАТЗ) становлять основу оцінки їх

функціональної придатності та ефективності у конкретних умовах експлуатації. Ці характеристики безпосередньо визначають здатність транспортного засобу виконувати поставлені логістичні завдання з мінімальними витратами ресурсів, часу та енергії.

До ключових показників належать:

1. Вантажопідйомність, що визначає максимальну масу вантажу, який може бути перевезений без перевищення нормативних обмежень;
2. Об'єм вантажного відсіку, який впливає на доцільність використання ВАТЗ у разі перевезень великогабаритних або об'ємних вантажів;
3. Потужність силової установки, що разом із крутним моментом визначає здатність до подолання ухилів, розгінні характеристики й загальну динаміку;
4. Паливна ефективність, виражена у витратах пального на 100 км пробігу або в показниках витрат енергії для електромобілів;
5. Динамічні характеристики – розгін до певної швидкості, максимальна швидкість, гальмівний шлях;
6. Маневреність і габарити, зокрема радіус повороту, висота/ширина, важливі для роботи в умовах обмеженого простору (наприклад, у міських районах або на промислових об'єктах);
7. Прохідність, що визначається конструкцією трансмісії, дорожнім просвітом, типом приводу і можливістю експлуатації на нерівномірному покритті або бездоріжжі;
8. Ресурсна ємність базових агрегатів транспортного засобу та показники пробігу між поточними ремонтами. Останнє здійснює вплив на надійність і планування необхідного обслуговування транспортних засобів.

Сучасні інтегровані цифрові системи управління сприяють підвищенню якості виконання транспортних операцій та забезпечують можливість прогнозувати поточний стан основних агрегатів транспортного засобу. Актуальність впровадження технологій обслуговування зростатиме і надалі, базуючись на аналізі великих даних.

Важливість техніко-експлуатаційних показників транспортних засобів з кожним роком зростає. Поряд із збереженням значущості класичних параметрів, таких як вантажопідйомність, потужність ТЗ, витрати пального, актуальності набувають нові характеристики, що віддзеркалюють перехід до цифрової мобільності, електричної незалежності та подальшої автоматизації. Відповідно, об'єктивною необхідністю є регулярне оновлення методології оцінювання показників з урахуванням новітніх технічних доробок, змін законодавчої і нормативної бази, зростаючих екологічних стандартів.

2. *Ергономічні властивості* вантажного автотransпортного засобу (ВАТЗ) формують комплекс характеристик, що визначають зручність, безпечність та ефективність взаємодії водія (або оператора) з транспортним засобом у процесі його експлуатації. У контексті сучасних вимог до транспорту ергономіка виходить за межі лише комфортності, стаючи чинником продуктивності, профілактики професійного перевантаження та безпеки руху.

До основних ергономічних характеристик, що підлягають оцінці, належать:

- антропометрична відповідність робочого місця водія (налаштування сидіння, розміщення органів керування, оглядовість);
- візуальна та тактильна доступність панелі приладів і елементів управління;
- ступінь вібраційного та шумового впливу на організм людини під час тривалої експлуатації;
- якість мікроклімату в кабіні (температурний режим, вентиляція, фільтрація повітря);
- можливості адаптації робочого простору до індивідуальних особливостей водія (зріст, вага, особливі потреби);
- інформаційне навантаження, обумовлене кількістю сигналів, повідомлень і режимів, з якими водій має взаємодіяти.

На сучасному етапі в конструкцію вантажних транспортних засобів інтенсивно впроваджуються рішення, що ґрунтуються на принципах інклюзивного, адаптивного та біоадаптивного дизайну. Останнє уможливорює проектування транспортних засобів з урахуванням різноманітних фізіологічних та когнітивних потреб споживачів.

Популярності набуває низка ерготехнології нового покоління, зокрема:

- багатопозиційні крісла з електронним налаштуванням і функціями масажу, підігріву/охолодження;
- багатофункціональні рульові колеса з адаптивним зусиллям;
- автоматичні системи підтримки температури, вологості, іонізації повітря;
- безключовий доступ і запуск;
- адаптивне LED- або лазерне освітлення.

Важливими нововведеннями є укорінення систем допомоги, які значно доповнюють можливості взаємодії з транспортним засобом (моніторинг мертвих зон, адаптивний круїз-контроль, системи утримання в смузі руху, автоматичне екстрене гальмування тощо). Знижуючи навантаження на водія, дані технології підвищують безпеку водіння, а також задають тенденції для автоматизації ВАТЗ. Новим викликом є дослідження методики оцінки когнітивного навантаження на водія при різних режимах керування.

При здійсненні вантажних перевезень ергономічні властивості транспортного засобу набувають особливого значення, адже при багатогодинних поїздках підвищується стомлюваність водія, ймовірність помилок за кермом, суттєво знижується рівень концентрації уваги.

Вважаємо, що ергономічні властивості ВАТЗ мають оцінюватися не на суб'єктивних відгуках, а на базі ефективних наукових методів, включаючи елементи біомеханічного моделювання, врахування інформації з трекерів руху та пульсомірів, лабораторних дослідженнях тощо.

Перспективним напрямом є створення цифрових близнюків кабіни з можливістю моделювання сценаріїв експлуатації під різні групи користувачів, що дозволяє ще на етапі проектування усунути ергономічні недоліки та адаптувати конструкцію до специфіки цільового ринку.

3. Екологічні характеристики вантажних автотransпортних засобів визначають ступінь їх впливу на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу — від виробництва до утилізації. У контексті глобальної екологічної трансформації транспортної системи ці показники набувають особливої ваги та стають предметом посиленої уваги як з боку регуляторів, так і з боку операторів транспортних послуг.

При виокремленні екологічних параметрів варто врахувати:

- дотримання вимог екологічних стандартів щодо рівнів викидів шкідливих речовин в атмосферу (оксидів азоту, твердих частинок, вуглеводнів та оксиду вуглецю);
- показник енергоефективності ТЗ (літрів пального або кВт·год на 100 км);
- оцінка обсягу викидів CO₂ у розрахунку на один кілометр або тонно-кілометр перевезення;
- рівень шумового впливу під час експлуатації транспортного засобу;
- наявність систем рекуперації енергії (гальмівної енергії, теплоти вихлопних газів тощо);
- екологічна утилізація транспортного засобу після завершення ресурсу (придатність матеріалів до переробки, наявність вторинної сировини).

У провідних країнах діють чіткі стандарти, що знижують рівень викидів в атмосферу для ВАТЗ завдяки впровадженню ретельної системи очищення відпрацьованих газів: селективної каталітичної нейтралізації, використання сажевих фільтрів, рециркуляції відпрацьованих газів. Ще однією вимогою сучасності є відмова від дизелю, декарбонізація автотранспорту, поширення електричних вантажівок,

орієнтованих на міську та регіональну дистрибуцію; водневих паливних елементів, що забезпечують більший запас ходу; біопального як проміжного етапу в екологізації дизельного транспорту; гібридних схем, які комбінують електротягу для оптимізації енерговитрат залежно від режиму руху.

Перехід до альтернатив вимагає принципово нових методів оцінки екологічної ефективності, зокрема:

- аналізу життєвого циклу, який охоплює повний цикл — виробництво, експлуатацію, техобслуговування, утилізацію;
- розрахунку екологічного індексу експлуатації, що включає енергоємність на тонно-кілометр, рівень забруднення у конкретному середовищі (місто, автомагістраль, гірський регіон);
- індексів сталого транспорту, які інтегрують економічні, соціальні та екологічні показники.

Актуальним напрямом є використання цифрових платформ моніторингу викидів у реальному часі, що дає змогу не лише оперативно оцінювати стан екосистеми, а й адаптувати режим роботи ВАТЗ до поточних умов навколишнього середовища.

Крім того, у межах концепції "зеленої логістики" транспортний засіб оцінюється не ізольовано, а як частина екосистеми ланцюга постачання. Це передбачає, що екологічність ВАТЗ розглядається крізь призму його впливу на сумарні викиди компанії, включно з перерозподілом маршрутів, оптимізацією навантаження, зменшенням кількості "порожніх" пробігів тощо.

4. *Оцінка економічної ефективності* вантажного автотранспортного засобу є критично важливою складовою процесу обґрунтованого вибору техніки для транспортно-підприємства, оскільки вона безпосередньо впливає на рівень операційних витрат, рентабельність перевезень та фінансову стійкість логістичних систем.

Економічна ефективність відображає повноту витрат протягом життєвого циклу транспортно-підприємства, починаючи з закупівельної вартості і включаючи низку непрямих витрат (простой техніки, штрафи за затримки, втратами вантажу). Таким чином, враховуючи сучасні методики, оцінка економічної ефективності вантажного автотранспортного засобу включає:

- врахування інфляції, ризиків та строків окупності інвестицій;
- оцінку окупності та внутрішньої норми прибутковості;
- порівняльний аналіз за сценаріями використання (інтенсивна експлуатація, міжміські рейси, міська дистрибуція тощо).

Зі зростанням популярності електричних та водневих вантажівок важливою стала оцінка не лише безпосередніх витрат, а й супутніх витрат інфраструктури (зарядні станції, ремонтні бази, доступ до водню).

Сьогодення диктує нові бізнес-моделі лізингу і довгострокової оренди транспортних засобів як інструментів економіки обслуговування. Споживач, орендуючи транспортний засіб, використовує автомобіль як вид послуги. Зазначена модель значно змінює структуру витрат і дозволяє ефективніше управляти транспортними активами з боку компаній, зменшуючи фінансові ризики та покращуючи гнучкість у відповідь на зміну попиту.

Окрему увагу слід приділити оцінці економічної надійності, оскільки навіть відносно недорогий ВАТЗ може спричинити суттєві втрати у разі простоїв через несправності, дефіциту запчастин або недостатньо розвиненої сервісної мережі. Тому до економічної ефективності слід відносити і ризики недоотриманого прибутку внаслідок технічних збоїв.

Сучасні транспортні аналітичні системи дозволяють формувати економічні дашборди в реальному часі, що агрегують дані телематики, обліку витрат,

навантаження й маршрутування для оперативного ухвалення рішень щодо економічної доцільності використання того чи іншого ТЗ. Таким чином, економічна ефективність у сучасній логістиці розглядається не лише як співвідношення витрат і доходів, а як інтегральна оцінка економічного ризику, стійкості, довгострокової вартості та відповідності техніки до стратегічних цілей перевізника.

5. *Адаптація* ВАТЗ до умов експлуатації включає як конструктивні і технічні, так і функціональні ідеї для того, щоб транспортний засіб функціонував стабільно та ефективно за визначеного режиму роботи в складних умовах зовнішнього середовища.

Рівень адаптації напряду віддзеркалює споживчі властивості транспортного засобу. Практика показує, що не завжди високотехнологічний ВАТЗ є запорукою надійності чи ефективності за умови невідповідності специфіці експлуатації останнього.

Саме тому, актуальності набувають пропозиції адаптивних платформ з модульною архітектурою для кращої відповідності транспортного засобу конкретному ринку. Наприклад, Mercedes-BenzTrucks, Iveco, Scania пропонують серії шасі з різними типами трансмісій, колісними формулами, налаштуваннями кліренсу, що можуть бути адаптовані до клієнтських вимог. Концепція "розумного автопарку" передбачає не лише вибір адаптованого ВАТЗ, а й можливість своєчасного переналаштування режимів роботи інструментами хмарних систем ОТА-оновлень.

Таким чином, адаптація ВАТЗ до умов експлуатації є динамічним критерієм, що вимагає врахування як апаратних, так і цифрових параметрів, а також гнучкості в обслуговуванні та налаштуванні техніки протягом її життєвого циклу.

На рисунку 2 наведено приклад блок-схеми, яка демонструє взаємозв'язки основних груп критеріїв споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів.

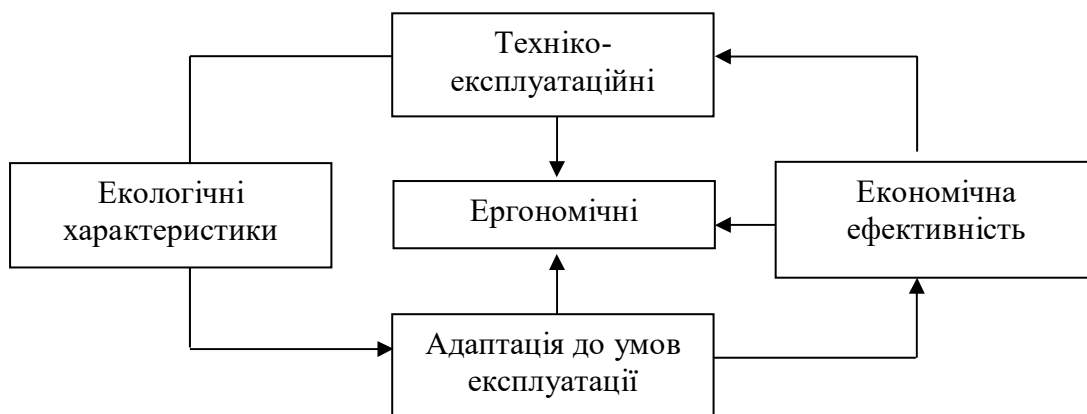


Рисунок 2 - Взаємозв'язок показників споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів
Джерело: розроблено авторами

Серед ключових сучасних тенденцій у галузі оцінки ВАТЗ варто виділити:

- інтеграцію цифрових двійників транспортних засобів для прогнозування ефективності в реальному часі.
- використання технології аналізу великих даних та інтернету в системах оцінювання, що дозволяє отримувати детальну інформацію про умови експлуатації.
- застосування системи "транспорт як послуга", яка передбачає оцінку цілого пакету послуг (підтримка, аналітика тощо).
- взаємодія транспортних засобів із логістичними цифровими платформами.

Всебічна оцінка споживчих властивостей – це необхідний етап формування ефективного автопарку та логістики. Сучасні методи дозволяють не лише враховувати традиційні експлуатаційні характеристики, але й адаптувати аналіз до нових умов — цифровізації, енергоефективності, екологічності.

Автори вважають, що оцінку споживчих властивостей ВАТЗ варто здійснювати, використовуючи багатокритеріальний підхід, що містить комплекс класичних техніко-експлуатаційних, економічних, ергономічних показників, а також новітні критерії, що відповідають вимогам сучасності, зокрема екологічної безпекою, цифровізації та адаптивності.

Сучасні тенденції в автомобілебудуванні – електрифікація, автономізація, модульність, інтеграція інтелектуальних систем – кардинально змінюють уявлення про споживчі властивості. Відбувається зміщення акценту з формальних технічних параметрів на комплексну оцінку ефективності у контексті сценарію використання життєвого циклу транспорту.

Висновки. 1. Для забезпечення об'єктивності та релевантності оцінювання споживчих властивостей вантажних автотранспортних засобів доцільно впроваджувати інтегральні цифрові моделі оцінки, які поєднують техніко-експлуатаційні, економічні, ергономічні та екологічні критерії в єдину систему. Такі моделі повинні враховувати не лише технічні параметри, а й реальні умови експлуатації, що дозволяє підвищити точність вибору транспортного засобу під конкретні логістичні завдання.

2. Необхідно укорінювати динамічні методики оцінювання, що відображають вимоги нових типів енергетичних систем (електро-, гібридних, водневих), сучасні сервісні моделі та вимоги щодо викидів в атмосферу. Використання таких динамічних методик оцінювання забезпечить стійкість системи оцінювання до технологічних і нормативних змін.

3. Взаємодіючи з інфраструктурою, енергопостачанням, інформаційними системами управління та сервісними мережами, вантажний автотранспортний засіб вже не є ізольованим об'єктом, а важливим елементом логістичної та енергетичної екосистеми, а тому потребує не лише оцінки технічного стану, а й системної інтегрованості.

Список літератури

1. Буряк М. В., Розум Р. І., Фалович Н. М., Прогній П. Б., Попович П. В., Шевчук О. С., Антонюк О. П. Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. 15(1). С. 17–22. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-17-22>.
2. Грицук І., Волков В., Онищук В., Український Є., Волкова Т., Стельмашук В. Дослідження паливної економічності вантажних транспортних засобів в умовах експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. 1(20). С. 137–144. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1042>.
3. Наумов В. С., Чернуха О. В. Дослідження ефективності використання вантажних автомобілів з урахуванням екологічних показників транспортного процесу. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2009. 1(3(37)). С. 48–50. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2009.3091>.
4. Хаврук В. Вплив техніко-експлуатаційних властивостей вантажних автомобілів на показники ефективності експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. 1(16). С. 168–175. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.519>.
5. Dmowski A., Ignaciuk P., Dębicka E., Niewczas A., Glavić D., Matijošius J. Operational quality of a truck: Expert's assessment. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2019. 83(1). С. 87–100. URL: www.researchgate.net/publication/364445311_operational_quality_of_a_truck_in_expert%27s_assessment.
6. Hassan T., Helo P. Performance assessment of high capacity trucks: Understanding truck selection and deployment economics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2021. Article 100363. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100363>.
7. Saeedi H., Wiegman B., Behdani B. Performance measurement in intermodal freight transport systems: Literature review and research agenda. *World Review of Intermodal Transportation Research*. 2022. 11(1). С. 1–52. URL: <https://doi.org/10.1504/WRITR.2022.123098>.
8. Sakhno V., Polyakov V., Murovany I., Sharai S., Lyashuk O., Plekan U., Sokol M. Stability of the two-link metrobus. *Communications*. 2023. 25(2). B77–B85.
9. Solakivi T., Ojala L. Environmental and economic potential of high-capacity trucks. *Case Studies on Transport Policy*. 2024. Article 101284. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101284>.
10. Taiebat M., Brown A. L., Safford H. R., Qu S., Xu M. A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles. *Environmental Science & Technology*. 2018. 52(20). С. 11449–11465. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00127>.

References

1. Buriak, M. V., Rozum, R. I., Falovych, N. M., Prohnii, P. B., Popovych, P. V., Shevchuk, O. S., & Antonyuk, O. P. (2022). Strength and reliability assessment of motor vehicles. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 15(1), 17–22. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-17-22> [in Ukrainian].
2. Hrytsuk, I., Volkov, V., Onyshchuk, V., Ukrainskiy, Ye., Volkova, T., & Stelmashchuk, V. (2023). Research of fuel efficiency of freight vehicles under operating conditions. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(20), 137–144. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1042> [in Ukrainian].
3. Naumov, V. S., & Chernukha, O. V. (2009). Efficiency research of freight vehicle use considering ecological characteristics of the transport process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(37)), 48–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2009.3091>.
4. Khavruk, V. (2021). Influence of technical and operational properties of trucks on efficiency indicators in operation. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(16), 168–175. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.519> [in Ukrainian].
5. Dmowski, A., Ignaciuk, P., Dębicka, E., Niewczas, A., Glavić, D., & Matijošius, J. (2019). Operational quality of a truck: Expert's assessment. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 83(1), 87–100. https://www.researchgate.net/publication/364445311_operational_quality_of_a_truck_in_expert%27s_assessment.
6. Hassan, T., & Helo, P. (2021). Performance assessment of high capacity trucks: Understanding truck selection and deployment economics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Article 100363. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100363>.
7. Saeedi, H., Wiegmanns, B., & Behdani, B. (2022). Performance measurement in intermodal freight transport systems: Literature review and research agenda. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 11(1), 1–52. <https://doi.org/10.1504/WRITR.2022.123098>.
8. Sakhno, V., Polyakov, V., Murovany, I., Sharai, S., Lyashuk, O., Plekan, U., & Sokol, M. (2023). Stability of the two-link metrobus. *Communications*, 25(2), B77–B85.
9. Solakivi, T., & Ojala, L. (2024). Environmental and economic potential of high-capacity trucks. *Case Studies on Transport Policy*, Article 101284. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101284>.
10. Taiebat, M., Brown, A. L., Safford, H. R., Qu, S., & Xu, M. (2018). A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles. *Environmental Science & Technology*, 52(20), 11449–11465. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00127>.

Oleg Tson, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Uliana Plekan**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.

Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil, Ukraine

Valuation of Consumer Properties of Freight Motor Vehicles

The article focuses on a detailed examination and assessment of the performance and consumer attributes of freight vehicles in light of contemporary demands for transportation efficiency, economic viability, environmental sustainability, and operational comfort. The significance of the research stems from increasing competition within the transport services sector, global trends toward digitalization, the adoption of alternative energy technologies, and the continual tightening of safety standards.

The lack of unified approaches to the assessment of consumer properties complicates the selection of optimal freight vehicle models for specific operating conditions, leading to reduced fleet efficiency and increased carrier costs. The purpose of the study is to develop a system of indicators for an objective multicriteria evaluation of the consumer properties of freight vehicles, taking into account their technical, operational, economic, ergonomic, and environmental characteristics.

The article presents a clear classification of consumer property indicators, highlighting five main groups: technical and operational indicators, which include load capacity, body volume, engine power, fuel efficiency, dynamic performance, maneuverability, cross-country capability, and component durability; ergonomic indicators, related to comfort, ease of control, and the safety level of the driver's workplace; environmental indicators, encompassing emission levels, noise emission, energy efficiency, and recyclability; economic indicators, assessing the total life-cycle cost, profitability, payback period, and financial sustainability of operation; adaptive indicators, reflecting the ability of freight vehicles to operate effectively under specific climatic, road, and infrastructural conditions.

The research identifies key trends in the adoption of advanced materials and innovative technologies, such as high-strength alloys, composite structures, electric and hybrid propulsion systems, hydrogen-based energy solutions, digital control mechanisms, integrated telematics frameworks, and automated driver assistance technologies. It is noted that the advent of new vehicle types necessitates updating conventional evaluation approaches by incorporating additional parameters—such as driving range, charging duration, battery durability, the functionality of digital services, and the cognitive demands placed on the driver.

freight vehicles, consumer properties, operational characteristics, evaluation, efficiency

Одержано (Received) 20.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656:338

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.313-320](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.313-320)

Д. В. Голуб, доц., канд. техн. наук, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук,

Р. П. Кічура, О. Ю. Ювженко

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: Dimchik529@gmail.com, AulinVV@gmail.com, romnik83@ukr.net, 40101001@gmail.com*

Визначення сукупності факторів ефективності функціонування автомобільних транспортних систем математичними методами аналізу

Проведено аналіз факторів визначення ефективності автомобільних транспортних систем за допомогою математичних методів. Виявлені найбільш впливові показники, що відображають кількісну характеристику властивостей цієї складної системи і дають можливість оцінити ступінь відповідності фактичного результату транспортних операцій бажаному. Показано, що ефективність таких операцій може бути оцінена різними математичними методами. Використовуючи дані методи можна визначити ймовірність безвідмовної роботи транспортної системи в конкретний період часу, якщо метою транспортних операцій є підвищення їх якості і надійності.

З'ясовано фактори, які враховуються при дослідженні ефективності автомобільних транспортних систем. Показано, що велика частка факторів не контролюється особою, яка приймає рішення. Здійснено їх розподіл та наведено детальну класифікацію.

Виявлено, що при дослідженні автомобільних транспортних систем з факторами, що мають випадкову природу значень, широко використовуються ймовірнісно-статистичні математичні методи. Вони дозволяють встановити розподіли випадкових змінних факторів. В той же час дослідження ефективності функціонування досліджуваних транспортних систем з урахуванням факторів нестохастичної природи, що є невизначеними, значно ускладнюється відсутністю загальної математичної теорії, що формує методологічні основи вивчення явищ з невизначеними факторами. Проте, застосування методів прикладної математики, як теорій ігор, прийняття рішень, а також нечітких множин, дозволяє знайти необхідні шляхи розв'язання поставлених завдань при наявності невизначеності, що має нестохастичний характер.

Розглянуто поняття функцій приналежності з позицій елементів теорії чітких і нечітких множин. Наведено різні варіанти таких функцій в аналітичній та графічній формах. Зазначено, що такі функції задають деяку підмножину або підобласть загальної допустимої області зміни факторів. Визначено, що підобласть, яка визначається функцією приналежності, в деякому розумінні відображає міру невизначеності досліджених факторів. Показано, що чим менша підобласть, що визначається функцією приналежності, тим менша міра невизначеності факторів. Визначено, що нечітка множина повністю описується своєю функцією приналежності і використовується як позначення нечіткої великої множини факторів. Виявлено, що нечітка множина є порожньою, якщо її функція приналежності дорівнює нулю для усіх елементів транспортної системи.

Розглянуто перетворення невизначених випадкових факторів ефективності автомобільних транспортних систем за допомогою методу рандомізації, який може бути досліджено поєднанням методів теорії ймовірності і математичної статистики.

автомобільна транспортна система, фактор, ефективність, операція, функція приналежності, рандомізація, ймовірність, експертне оцінювання, множина факторів

Постановка проблеми. Ефективність функціонування автомобільної транспортної системи полягає у здатності забезпечувати результат її роботи, враховуючи умови експлуатації та методи застосування активних засобів управління [1-3]. Головною метою управління автомобільною транспортною системою є максимізація ефективності використання активних засобів під час виконання поставлених завдань.

Показники ефективності відображають кількісну характеристику властивостей системи та дають можливість визначити ступінь відповідності фактичного результату транспортних операцій бажаному [4-6]. Ці показники можуть мати ті ж одиниці вимірювання, що і показники якості, або бути безрозмірними. Розподіл показників ефективності, які описують роботу автомобільної транспортної системи, на показники якості і ефективності є відносним та залежить від характеру розв'язуваних завдань [7, 8]. На основі цих показників розробляється правило вибору оптимального способу використання активних засобів у стратегічних транспортних операціях, яке ґрунтується на критеріях ефективності функціонування транспортної системи.

У процесі дослідження ефективності роботи автомобільних транспортних систем використовуються методологічні підходи, що базуються на експериментальних дослідженнях та моделюванні, передусім математичному. Після цього відбувається вибір пріоритетної мети та організовується виконання операцій для її досягнення. Ефективність таких операцій може бути оцінена різними способами. Це можливо здійснити через імовірність безвідмовної роботи транспортної системи в конкретний період часу. При цьому метою реалізації транспортних операцій є підвищення їх якості та надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед факторів, які враховуються при дослідженні ефективності автомобільних транспортних систем, велика їхня частка не контролюється особою, яка приймає рішення [1, 2, 4, 9, 14]. Це стосується передусім об'єктивних законів природи і громадського розвитку, які необхідно враховувати у будь-якому випадку [6, 14]. Неконтрольованими є й такі фактори: погодні умови, дії конкурентів та ін. [10, 15]. Останні фактори характеризують умови функціонування автомобільних транспортних систем.

До керованих факторів належать ті, на які особа, що приймає рішення, здатна впливати на свій розсуд. Це означає, що такими факторами можна управляти під час планування та реалізації транспортних операцій [11]. До цієї категорії належать фактори, які визначають особливості функціонування автомобільних транспортних систем [16]. При цьому зазначимо, що стратегії розвитку таких транспортних систем формуються з безлічі керованих факторів, а умови застосування можуть формуватися як з множини керованих, так і некерованих факторів.

Зовнішні фактори як корисні, так і шкідливі, визначають вплив навколишнього середовища, який може як сприяти ефективному виконанню транспортних операцій, так і перешкоджати їхньому успіху. Внутрішні фактори описують взаємодію рушійних сил у межах транспортних систем, що впливає на хід та підсумок виконання операцій [1, 6, 7, 14, 16].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методологічного підходу щодо з'ясування факторів визначення ефективності функціонування автомобільних транспортних систем за допомогою математичних методів аналізу.

Виклад основного матеріалу. При дослідженні ефективності функціонування автомобільних транспортних систем використовуються фактори, класифікація яких наведена на рис. 1.

З інформативної точки зору про змінні фактори в автомобільних транспортних системах їх можливо поділити на визначені Λ_F і невизначені Λ_Ω . До визначених факторів належать змінні, значення яких точно відомі. Це можуть бути задані параметри, регулярні функції конкретних аргументів тощо. До цієї категорії також відносяться контрольовані вхідні впливи, включаючи керовані величини.

До невизначених факторів належать ті значення, які у реальних процесах автомобільних транспортних систем відомі лише частково. Джерела невизначеності цих факторів (змінних) можуть мати різну природу. Здебільшого їх поділяють на дві категорії: випадкові змінні Λ_E та змінні з нестохастичною природою невизначеності Λ_J .

Коли відомий розподіл випадкової змінної, її вважають статистично визначеною. Випадкові змінні з невідомим розподілом поділяються на два типи:

- що мають відомі параметри (статистичні характеристики) розподілу;
- що мають невідомі параметри (статистичні характеристики).

При дослідженні автомобільних транспортних систем з випадковими факторами широкого застосування набувають ймовірностно-статистичні методи. Це методи параметрично-статистичного аналізу, які дозволяють визначати параметри розподілення випадкових змінних, спираючись на результати статистичних випробувань, коли це можливо. Методи непараметричного оцінювання застосовуються для встановлення розподілів випадкових змінних.



Рисунок 1 – Схема класифікації факторів визначення ефективності автомобільних транспортних систем

Джерело: розроблено авторами

Нестохастична невизначеність зазвичай виникає внаслідок таких обставин:

- існує цілеспрямована протидія з боку конкуруючої транспортної системи, дії якої залишаються невідомими – поведінкова невизначеність Λ_J^B ;
- недостатній рівень дослідження окремих явищ, які супроводжують робочий процес транспортної системи – природна невизначеність Λ_J^N ;
- нечітке уявлення мети транспортних операцій у відповідності до реального її результату, який створює можливість різного тлумачення, тобто викликає цільову невизначеність $\Lambda_J^{A_0}$.

Невизначені фактори нестохастичного характеру Λ_J можна умовно класифікувати на дві категорії:

- для яких відомі функції приналежності та діапазони значень змінних;
- для яких функції приналежності залишаються невідомими.

Найбільша невизначеність виникає у випадку факторів, для яких не визначені функції приналежності. Як правило, до таких факторів застосовують метод експертного оцінювання для встановлення діапазону їх можливих значень.

Аналіз ефективності автомобільних транспортних систем, який враховує невизначені фактори нестохастичного характеру, значно ускладнюється через відсутність достатньо універсальної математичної теорії, що формує методологічні основи вивчення явищ з невизначеними факторами. Проте, застосування теорій нечітких множин, ігор та прийняття рішень створює можливість знаходження певних підходів до аналізу ефективності транспортних систем в умовах значної нестохастичної невизначеності.

Функції приналежності відображають певні судження в кількісній мірі. Вони задають деяку підмножину або підобласть загальної допустимої області зміни фактора. Підобласть, що визначається функцією приналежності, в деякому розумінні відображає міру невизначеності фактора. Зрозуміло, чим менша підобласть, що визначається функцією приналежності, тим менша міра невизначеності фактора [12, 13]. У межі функції приналежності, якщо виділяється одне значення фактора, то переводять його в розряд певних факторів.

Розглянемо поняття функції приналежності з позицій елементів теорії чітких і нечітких множин. Поняття функції приналежності нечіткої множини є досить широке узагальнення функції приналежності звичайної множини.

Нехай A є підмножина універсальної множини D . Елементами цієї множини є $d_i (d_i \in D)$. Нехай функція приналежності $\mu_A(d)$, що характеризує міру приналежності елемента d_i підмножині A , відображається на відрізок $[0, 1]$.

Для звичайної множини функція приналежності є релейною, тобто набуває значень:

$$\mu_A(d) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } d \in A; \\ 0, \text{ якщо } d \notin A. \end{cases} \quad (1)$$

Звичайні множини можна розглядати, як окремі випадки великих нечітких множин. Нечітка підмножина A , що є складовою універсальної множини D визначається за допомогою функції приналежності $\mu_A(d): D \rightarrow [0, 1]$, яка кожному елементу $d_i \in D$ ставить у відповідність число $\mu_A(d)$ з заданого відрізка $[0, 1]$, що характеризує міру приналежності елемента d_i підмножині A .

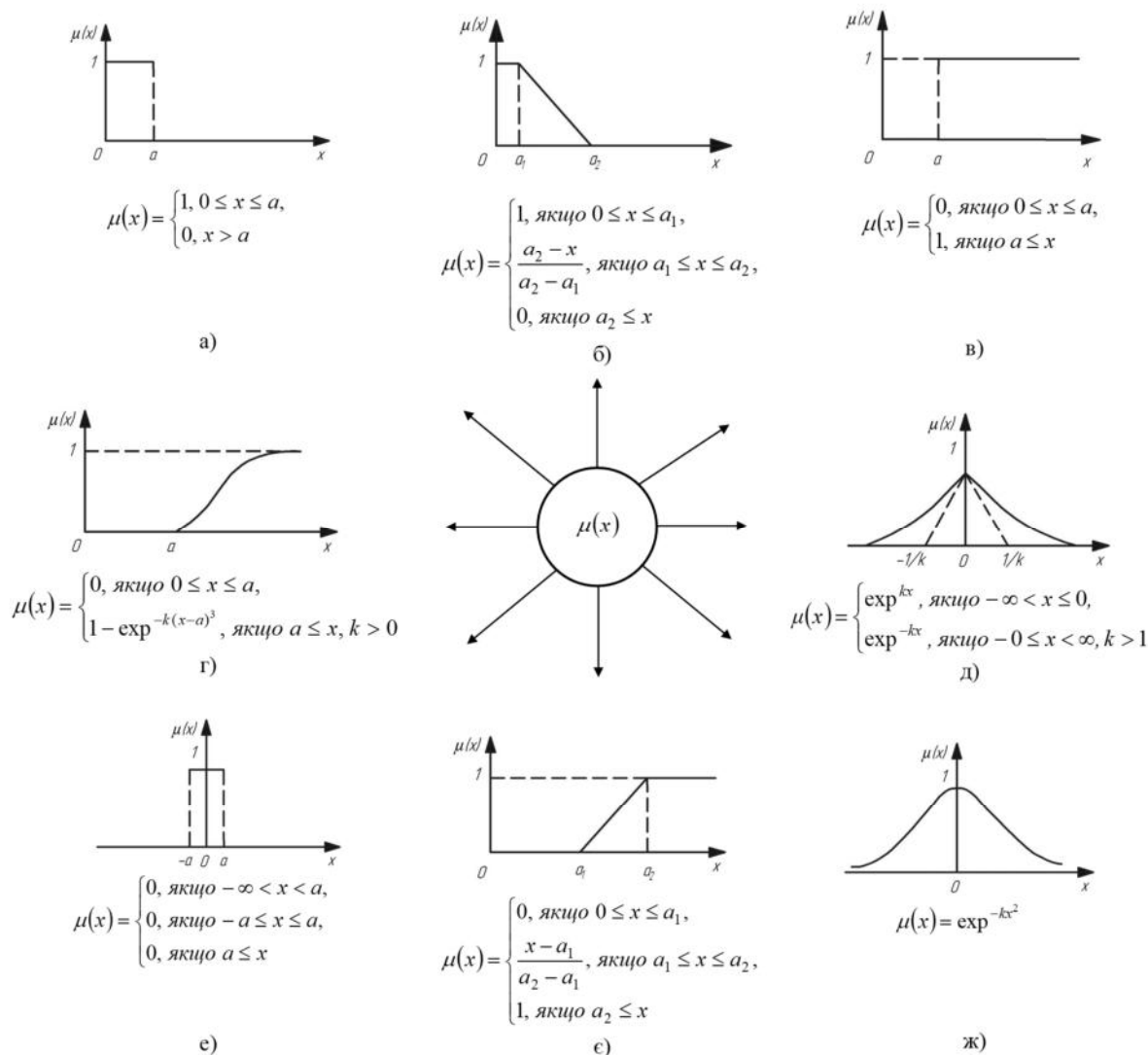
Нечітка множина повністю описується своєю функцією приналежності і тому її зазвичай використовують як позначення нечіткої великої множини. Вона вважається порожньою, якщо функція її приналежності для всіх елементів має значення нуль:

$$\mu_o(d) = 0, \text{ для будь-яких } \forall d_i \in A. \quad (2)$$

Звичайна множина, функція приналежності якої відмінна від нуля, є носієм нечіткої множини $\mu_A(d)$. З цими даними можна поступати як із звичайним статистичним матеріалом й отримати певну усереднену функцію приналежності. Типові види функцій приналежності наведені на рис. 2.

Розглянемо як здійснюється перетворення невизначених факторів в розряд випадкових. Деякі невизначеності, які мають нестохастичний характер, іноді можливо перетворити на випадкові фактори за рахунок використання методу рандомізації. Рандомізація полягає у штучному додаванні елемента випадковості в умови, де вона спочатку відсутня. При аналізі ефективності функціонування автомобільних транспортних систем для пошуку об'єктів може бути відома лише приблизна область

розташування певного об'єкта. Розташування об'єкта є визначеним, але можна припустити, що в межах заданої області воно підпорядковується рівномірному ймовірнісному розподілу. Таким чином, штучно створюється випадковість у визначенні положення об'єкта. Подальший аналіз цієї рандомізації можливий за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики.



а-ж) графічно-аналітичні відображення функцій приналежності

Рисунок 2 – Типові види функцій приналежності

Джерело: розроблено з використанням джерел [12, 13]

Функцію приналежності також подають у формі лінгвістичної змінної, тобто змінної, значення якої описуються словесними виразами. Наприклад, категорія «складність» у контексті автомобільної транспортної системи є лінгвістичною змінною, а її можливі значення можуть формулюватися як: не складною, не дуже складною, складною, досить складною, дуже складною.

У певному класі автомобільних транспортних систем лінгвістична змінна визначає нечітку множину (рис. 3). Для значення «складна система» функція приналежності $\mu_{\Omega}(x)$ формує відповідну нечітку підмножину всередині загальної множини систем, які відрізняються кількістю зв'язків між їхніми елементами.

На практиці для визначення функції приналежності часто використовують експертне опитування, щоб встановити частку експертів, які при заданому значенні x класифікують транспортну систему як складну. Ця частка експертів приймається як значення функції приналежності $\mu_Q(x)$. Наприклад, якщо з десяти експертів четверо класифікували транспортну систему з 20 зв'язками як складну, тоді значення функції приналежності становить $\mu_Q(x) = 0,4$.

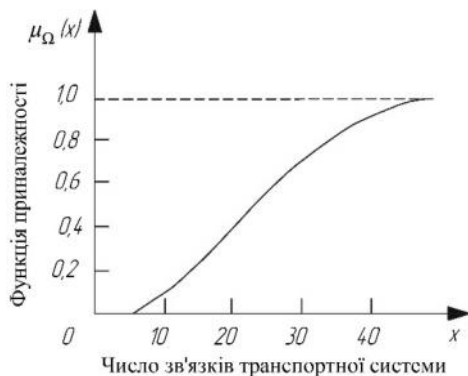


Рисунок 3 - Функція приналежності нечіткої множини складних автомобільних транспортних систем

Джерело: розроблено авторами

Слід також зазначити, що для характеристики невизначених факторів, які не є стохастичними, застосовують суб'єктивну ймовірність і аналіз автомобільних транспортних систем базується на методах теорії ймовірностей. Однак використання суб'єктивної ймовірності може призвести до того, що закон великих чисел не діятиме. Зазвичай така ймовірність визначається шляхом експертного оцінювання.

Висновки. 1. З'ясовано фактори, які враховуються при дослідженні ефективності функціонування автомобільних транспортних систем, наведена їх класифікація. Визначено, що більша частка яких не контролюється особою, яка приймає рішення.

2. Виявлено, що при дослідженні автомобільних транспортних систем з випадковими факторами широко використовуються ймовірностно-статистичні математичні методи, що дозволяють встановити їхні розподіли як випадкових змінних.

3. Встановлено обставини введення функції приналежності, її трактування з позицій елементів теорії чітких і нечітких множин. Наведено різні варіанти таких функцій в аналітичній та графічній формах.

4. Розглянуто перетворення невизначених факторів ефективності функціонування автомобільних транспортних систем в розряд випадкових та застосування суб'єктивної ймовірності й визначення її методом експертного оцінювання.

Список літератури

1. Ачкасова Л.М. Обґрунтування факторів ефективності перевезення вантажів. *Економіка транспортного комплексу*. Вип. 25, 2015. С. 145-153.
2. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*, №2, 2017. С. 4-14.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків: ХНАДУ, Вип. 81, 2018. С. 3-10.

4. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*, №1(11), 2020. С.5-10.
5. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лисенко С.В. та ін. Оцінка працездатності автомобільних транспортних систем на основі математичних методів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, №22, 2020. С. 262-271.
6. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Особливості дослідження ефективності транспортних систем на етапах життєвого циклу. *Вісник машинобудування та транспорту*, №13(1), 2021. с. 4-12.
7. Волобуєва Т. В., Сирота В. М., Мастепан С. М. та ін. Формування умов ефективного функціонування транспортної системи автотранспортного підприємства. *Вісник машинобудування та транспорту*, №1(19), 2024. С. 21-28.
8. Голуб Д.В. Методи та підходи до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах. *Вісник ЦНТУ. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5(36). Ч.1 С. 317-327.
9. Голуб Д.В., Аулін В.В., Біліченко В.В. та ін. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*, №15(1), 2022. С. 6-14.
10. Голуб Д.В. Підвищення ефективності управління технологічним процесом доставки на основі аналізу статичних та динамічних резервів транспортної системи. *Вісник ЦНТУ. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, Вип. 7(38). Ч.1, 2023. С. 214-221.
11. Голуб Д.В., Біліченко В.В., Аулін В.В. та ін. Забезпечення та підвищення надійності й ефективності процесу автомобільних вантажних перевезень побудовою дерева відмов структурних елементів транспортної системи. *Вісник машинобудування та транспорту*, №18(2), 2023. С. 46-55.
12. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 387 с.
13. Ус С.А., Коряшкіна Л.С. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. випр. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 300 с.
14. Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., & Chen, A. Performance of transportation network under perturbations: reliability, vulnerability and resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 133 (1), 2020. pp. 204-211.
15. Miller-Hooks E., Zhang X., Faturechi R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Comput Operations Res*, Vol.39, 2012. pp. 1633-1643.
16. Shofiq A., Kakan D. Resilience modeling concepts in transportation systems: a comprehensive review based on mode, and modeling techniques. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, Vol. 1, № 8, 2020. pp. 1-20.

References

1. Achkasova, L. M. (2015). Justification of efficiency factors of freight transportation. *Ekonomika transportnoho kompleksu*, 25, 145–153 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2017). Methodology of approaches to researching ways and factors ensuring transport efficiency and reliability. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 2, 4–14 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2018). Implementation of the physical-information approach to improving transport reliability and efficiency. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 81, 3–10 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2020). Formation of indicators to evaluate transportation process efficiency. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1(11), 5–10 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Holub, D. V., Lysenko, S. V., et al. (2020). Performance assessment of automotive transport systems using mathematical methods. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, 22, 262–271 [in Ukrainian].
6. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2021). Features of transport efficiency evaluation at life-cycle stages. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 13(1), 4–12 [in Ukrainian].
7. Volobuieva, T. V., Syrota, V. M., Mastepan, S. M., et al. (2024). Formation of conditions for efficient operation of enterprise transport systems. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1(19), 21–28 [in Ukrainian].
8. Holub, D. V. (2022). Methods and modeling approaches to efficiency of transport systems operations. *Visnyk TsNTU. Tekhnichni nauky*, 5(36)(1), 317–327 [in Ukrainian].
9. Holub, D. V., Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., et al. (2022). System approach for evaluating regional transport system efficiency. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 15(1), 6–14 [in Ukrainian].

10. Holub, D. V. (2023). Improving technological delivery process efficiency based on dynamic/static reserve analysis. *Visnyk TsNTU. Tekhnichni nauky*, 7(38)(1), 214–221 [in Ukrainian].
11. Holub, D. V., Bilichenko, V. V., Aulin, V. V., et al. (2023). Reliability and effectiveness of freight operations using structural failure tree analysis. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 18(2), 46–55 [in Ukrainian].
12. Zheldak, T. A., Koriashkina, L. S., & Us, S. A. (2020). Fuzzy sets in decision-making systems: Textbook. Dnipro: NTU "DP" [in Ukrainian].
13. Us, S. A., & Koriashkina, L. S. (2018). Models and methods of decision-making: Textbook (2nd ed.). Dnipro: NTU "DP" [in Ukrainian].
14. Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., & Chen, A. (2020). Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability and resilience. *Transportation Research Part E*, 133, 204–211.
15. Miller-Hooks, E., Zhang, X., & Fatouehi, R. (2012). Measuring and maximizing resilience of freight networks. *Computers & Operations Research*, 39, 1633–1643.
16. Shofiq, A., & Kakan, D. (2020). Resilience modeling concepts in transport systems: A comprehensive review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1(8), 1–20.

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Ruslan Kichura**, **Oleksandr Yuvzenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determination of the Set of Factors of Efficiency of Functioning of Automobile Transport Systems by Mathematical Methods of Analysis

An analysis of the factors determining the efficiency of automobile transport systems using mathematical methods has been conducted. The most influential indicators reflecting the quantitative characteristics of this complex system have been identified, allowing for an assessment of the degree of correspondence between the actual results of transport operations and the desired outcomes. It has been shown that the efficiency of such operations can be evaluated using various mathematical methods. By applying these methods, it is possible to determine the probability of the transport system's reliable operation over a specific period if the goal of transport operations is to enhance their quality and reliability.

The factors considered in the study of the efficiency of automobile transport systems have been identified. It has been demonstrated that a significant portion of these factors is beyond the control of the decision-maker. These factors have been categorized, and a detailed classification has been provided.

It has been revealed that in the study of automobile transport systems involving factors with stochastic variability, probability-statistical mathematical methods are widely used. These methods allow for determining the distributions of random variable factors. At the same time, assessing the efficiency of transport system operations while considering factors of a non-stochastic nature, which are uncertain, is significantly complicated by the lack of a general mathematical theory that forms a methodological basis for studying phenomena with uncertain factors. However, the application of applied mathematics methods, such as game theory, decision-making theory, and fuzzy set theory, enables the development of solutions to problems under conditions of uncertainty of a non-stochastic nature.

The concept of membership functions has been examined from the perspective of elements of crisp and fuzzy set theories. Various forms of such functions in both analytical and graphical representations have been presented. It has been noted that these functions define a certain subset or subregion of the overall permissible range of factor variations. It has been determined that the subregion defined by the membership function, in a certain sense, reflects the degree of uncertainty of the studied factors. It has been shown that the smaller the subregion determined by the membership function, the lower the degree of uncertainty of the factors. It has been established that a fuzzy set is fully described by its membership function and is used to represent a large and imprecisely defined set of factors. It has also been found that a fuzzy set is empty if its membership function equals zero for all elements of the transport system.

The transformation of uncertain random factors affecting the efficiency of automobile transport systems has been examined using the method of randomization. This method can be analyzed through a combination of probability theory and mathematical statistics methods.

automobile transport system, factor, efficiency, operation, membership function, randomization, probability, expert assessment, set of factors

Одержано (Received) 11.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 25.11.2025

К. Г. Ковцур, доц., канд. техн. наук, **І. І. Оленчук**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: kovtsyr@ukr.net

Каршерінг як інструмент розвитку сталої міської мобільності (на прикладі м. Тернопіль)

Розглянуто каршерінг як перспективний інструмент розвитку сталої міської мобільності в Україні на прикладі м. Тернопіль. Визначено основні транспортні та екологічні проблеми, пов'язані з інтенсивною автомобілізацією. Проаналізовано сучасні моделі каршерінгу, а також тенденції розвитку українського ринку цієї послуги. Розроблено підхід до оцінки витрат на впровадження каршерінгової компанії, що включає початкові та експлуатаційні витрати. Запропоновано оптимальні місця розташування станцій каршерінгу в місті Тернопіль із урахуванням транспортної логістики та пасажиропотоків. Доведено, що впровадження каршерінгу сприяє зменшенню кількості приватних автомобілів, скороченню викидів оксиду вуглецю, зниженню транспортних заторів і підвищенню якості життя мешканців.

каршерінг, міська мобільність, сталий розвиток, станція каршерінгу транспортна інфраструктура

Постановка проблеми. Сучасні великі міста стикаються з низкою транспортних проблем, зумовлених інтенсивним ростом автомобілізації, обмеженими ресурсами вулично-дорожньої мережі та підвищеним рівнем екологічного навантаження. Збільшення кількості приватних автомобілів спричиняє перевантаженість транспортної інфраструктури, затримки у русі, зростання кількості дорожньо-транспортних пригод і суттєве погіршення екологічної ситуації. У відповідь на ці виклики впроваджуються сучасні концепції мобільності, серед яких каршерінг є одним із найбільш перспективних напрямів.

На сьогодні каршерінг є альтернативним варіантом індивідуального транспорту, використання якого дозволить зменшити витрати на перевезення, зменшити кількість автомобілів на дорогах, тим самим зменшити час у заторах, і підвищити ефективність використання транспортної інфраструктури [1]. Водночас, впровадження каршерінгу в нових районах обслуговування (містах) потребує детального аналізу та оцінки їхньої доцільності з врахуванням конкретних умов міста та його особливостей. Основними факторами, що впливають на ефективність впровадження каршерінгу в новий район обслуговування, є чисельність населення, експлуатаційні витрати автомобілів, наявність або капітальні витрати на створення інфраструктури для паркування та зарядних станцій електромобілів. Проблемним та до кінця невизначеним й досі залишається нормативно-правове регулювання впровадження каршерінгу та його використання.

З огляду на ці тенденції, найбільший потенціал розвитку каршерінгу зберігається саме у великих містах з високою щільністю населення, значною транспортною активністю та наявною інфраструктурою для підтримки альтернативних моделей мобільності.

На ринку каршерінгу в Україні представлені два основні оператори: Getmancar та Mobilecar. Getmancar є лідером у цьому сегменті, пропонуючи різноманітні автомобілі та тарифи, тоді як Mobilecar спеціалізується виключно на електричних автомобілях.

Розвиток ринку каршерінгу в Україні почався у 2017 році. Спершу послуга з'явилася в Одесі та Києві, а тепер каршерінг доступний у містах Київ, Дніпро та Одеса.

Мапу покриття зон каршерінгу та вільних автомобілів в Києві та Дніпрі наведено на рисунку 1 та 2 відповідно. Компанія Getmancar також запускала тестовий сервіс у Львові, надаючи можливість пересуватися Львівською, Тернопільською, Івано-Франківською, Закарпатською і Волинською областями. Однак після завершення тестування ця послуга у Львові більше не працює. З огляду на особливості ринку, каршерінг користується більшим попитом саме у великих містах.

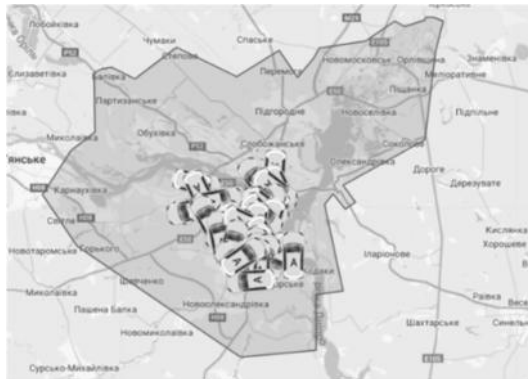


Рисунок 1 – Мапа зон каршерінгу та вільних автомобілів в м. Дніпро компанії Getmancar
Джерело: розроблено на підставі [2]



Рисунок 2 – Мапа зон каршерінгу та вільних автомобілів в м. Київ компанії Getmancar
Джерело: розроблено на підставі [2]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження підтверджують значний потенціал каршерінгу як інструменту оптимізації транспортних потоків у містах.

Так в роботі [3] на прикладі міст Північної Америки проведе дослідження, за результатами якого відзначається скорочення сумарного пробігу учасників на 27 % в рамках одного домогосподарства. Слід розуміти, що такий результат не може бути універсальний, а буде безпосередньо залежати від кількості автомобілів в одному домогосподарстві, готовності власників відмовитись від використання власного автомобіля та розвиненості інфраструктури каршерінгу. Дослідження показали, що середня відстань поїздки американців більша, ніж канадців, а отже і ефект від провадження каршерінгу є більш очевидний саме для американців. Автори відзначають, що каршерінг стає сталим варіантом для задоволення потреб у пересуванні населення автомобілями у містах Північної Америки, що може бути притаманне і для великих міст України.

Також дослідження вказують на те, що впровадження каршерінгу зменшує кількість приватного автомобіля через можливість надання доступу до автомобіля «за вимогою». Так при використанні модуля round-trip (станційний каршерінг) майже 20 %

користувачів після використання каршерінгу продали власний автомобіль і майже половина відклали або зовсім відмовилися від купівлі нового автомобіля [4]. Слід зазначити, що такі результати досягаються саме в великих містах із розвинутою транспортною мережею.

Дослідження у сфері інтеграції каршерінгу з громадським транспортом демонструють значні переваги для міської мобільності. Каршерінг, на рівні з електросамокатами та велосипедами, може стати доповненням до громадського транспорту, забезпечуючи так звану «останню милю» – поїздки від транспортних вузлів до кінцевих пунктів призначення, наприклад, від зупинки громадського транспорту до дому чи офісу. Така інтеграція каршерінгу в транспортні системи громадського транспорту в країнах Європи є розповсюдженою практикою.

Слід відзначити, що теоретичних доробок щодо ефективності використання каршерінгу достатня кількість, хоча практичного підтвердження цьому обмаль. Так в роботі [5] зазначено, що параметр «car sharing option» не є статистично значущим у моделях придбання, продажу або заміни автомобіля. Хоча окремі характеристики каршерінгу, такі як, наприклад, відстань до станції каршерінгу, мають помірний вплив. Побудовані емпіричні моделі оцінки впливу самої наявності опції каршерінг підтверджують гіпотезу, що для досягнення ефекту від впровадження каршерінгу та для зменшення рівня автомобілізації необхідно поєднувати розвиток каршерінгу з інформаційними заходами та стимулюючою транспортною політикою.

Так вчені відзначають, що впровадження каршерінгу сприяє зменшенню викидів парникових газів в атмосферу в великих містах. Такий результат досягається не через технічні аспекти, а як баланс між тими, хто з учасників залишив в використанні особистий транспорт, тими, хто перейшов на запропоновану систему каршерінгу з особистого транспорту, та тими, хто не мав особистого транспорту, а перейшов до використання каршерінгу. Так в роботі [6] зазначають, що збільшення кількості зарядних станцій для електроавтомобілів до 50% від кількості бензинових станцій збільшить ймовірність використання електрокарів у каршерінгу, тим самим скорочуючи викиди CO₂ на 655 773 т / рік. Отже ефективність каршерінгу зростає зі збільшенням кількості заправних та зарядних станцій. В роботі представлено три типи емпіричних моделей вивчення впливу зміни режиму пересування на викиди оксиду вуглецю: модель змішаного логіту, бінарна логіт-модель (для аналізу готовності відмовитися від володіння транспортним засобом чи запланованої покупки автомобіля) та модель визначення міри заміни приватного транспорту чи громадського транспорту каршерінгом, та як це вплине на мобільність.

Для більш ефективного впровадження каршерінгу в існуючу транспортну систему доцільним буде розробка єдиної цифрової платформи, де б інтегрувались різні види транспорту [7-8]. Такий застосунок дав би змогу оплатити за послуги використання транспорту (одноразова поїздка, використання наскрізного тарифу або різних типів місячних абонементів), сформувати раціональний маршрут і спрогнозувати час прибуття до пункту призначення. Така платформа дозволяє отримати більш точну інформацію про мобільність населення для управління транспортною системою міст.

В наукових дослідженнях [9-10] зазначають необхідність державного субсидування каршерінгу. Так для успішної інтеграції каршерінгу у концепцію «мобільність як послуга» (MaaS) необхідне державне фінансування. Під MaaS слід розуміти інтеграцію різних видів транспорту в єдину цифрову платформу, яка дозволяє користувачу планувати, бронювати та оплачувати поїздки через один сервіс. В роботі

[10] відмічають, що попередні ініціативи МaaS не завжди досягали бажаних результатів через невідповідність з транспортними потребами користувачів.

На основі аналізу літературних джерел виявлено важливість інтеграції електричного каршерінгу в концепцію сталого розвитку міського транспорту та необхідність державного дофінансування каршерінгу. Але слід розуміти, що рішення щодо впровадження каршерінгу не є універсальними, часто є специфічними для конкретного міста, тому їх важко масштабувати і адаптувати під «новий» район обслуговування.

Постановка завдання. З метою сталого розвитку міської мобільності міст України актуальним є розробка науково-обґрунтованих підходів оцінки ефективності впровадження каршерінгу у великих містах України. Для цього стає доцільним визначення ключових факторів, що чинять вплив на ефективність впровадження каршерінгу в районах обслуговування.

Для досягнення цієї мети передбачається вирішення таких завдань:

- дослідити існуючі моделі каршерінгу та їх адаптацію до умов українських міст;
- провести аналіз критеріїв ефективності впровадження каршерінгової компанії;
- розробити методiku визначення витрат на впровадження каршерінгової компанії.

Виклад основного матеріалу. Каршерінг (англ. carsharing – спільне використання автомобіля) є альтернативою для звичної моделі використання автомобілем. Під каршерінгом розуміють користування автомобілем декількома особами. Використання каршерінгу має багато переваг: перш за все дозволяє швидко та зручно вирішити потребу в пересуванні, крім того дозволяє зменшити витрати, що пов'язані з утриманням приватного автомобіля.

Аналіз літературних джерел щодо впровадження каршерінгу та практики його використання дозволили встановити, що виділяють три групи каршерінгу за способом наданих послуг: Free-floating, Peer-to-peer та Fractional.

Free-floating (Вільний каршерінг) – це короткострокова оренда автомобіля з можливістю завершення поїздки в будь-якій зручній для водія точці або на спеціально позначених парковках. Таку модель впроваджують каршерінгові компанії, які активно розвиваються як на світовому, так і на українському ринку. Цей формат оренди з оплатою за хвилину або годину зазвичай використовується для коротких поїздок містом.

Peer-to-peer (P2P) каршерінг – це модель оренди автомобілів, що працює за принципом класичного каршерінгу, але автомобілі здебільшого знаходяться у приватній власності або належать компаніям, чия основна діяльність не пов'язана з орендою чи прокатом автомобілів [5]. Оренда автомобілів від приватних осіб здійснюється переважно через онлайн-платформи, які об'єднують усі приватні пропозиції на одному майданчику. Ця модель широко поширена в США, де найбільше відомі такі компанії, як Turo і Getaround.

Пропонується впровадити каршерінг в місті Тернопіль. Це обласний центр з населенням близько 250 тисяч людей, що робить його ідеальною платформою для запуску каршерінгу. Окрім цього, впровадження каршерінгу сприятиме зменшенню кількості приватних автомобілів на дорогах Тернополя, що позитивно позначиться на екологічній ситуації [6, 7]. Запуск каршерінг-системи також сприятиме створенню нових робочих місць і розвитку концепції «розумного міста», підвищуючи якість життя та транспортного обслуговування мешканців міста [8].

Один каршерінг-автомобіль може замінити до (10–15) приватних автомобілів, оскільки люди відмовляються від особистих автомобілів на користь спільного користування транспортом. Багато компаній, що надають послуги з оренди автомобілів, такі як ECOAuto, UNIT.City, Getmancar, використовують саме автомобілі з електричними двигунами, що дозволяє мінімізувати викиди оксидів вуглецю у містах. [9, 10].

Практика впровадження такого виду оренди автомобілів показала, що користувачі каршерінгу зазвичай планують свої поїздки завчасно, формують раціональні маршрути, іноді поєднуючі використання орендного і громадського транспорту.

Критерієм ефективності впровадження каршерінгової компанії є витрати. Цільова функція витрат на впровадження каршерінгової компанії виглядатиме наступним чином:

$$S_{\text{кш}}(n_{\text{ст}}, n_{\text{авт}}, \delta_{\text{пр}}) = B_{\text{авт}}(n_{\text{авт}}, n_{\text{ст}}) + B_{\text{р}}(\delta_{\text{пр}}, n_{\text{авт}}) + B_{\text{пр}}(n_{\text{ст}}, \delta_{\text{пр}}) + B_{\text{д}}(n_{\text{ст}}, \delta_{\text{пр}}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $n_{\text{ст}}$ – кількість станцій каршерінгу, од.;

$n_{\text{авт}}$ – кількість рухомого складу каршерінгу, од.;

$\delta_{\text{пр}}$ – коефіцієнт недовикористання провізних можливостей автопарку;

$B_{\text{авт}}$ – витрати на закупівлю автомобілів, грн.;

$B_{\text{р}}$ – витрати на ремонт рухомого складу, грн.;

$B_{\text{пр}}$ – витрати від простою автомобіля на каршерінгових станціях, грн.;

$B_{\text{д}}$ – витрати на доставку автомобілів до каршерінгових станцій, грн.

Виходячи з невеликих розмірів м. Тернопіль, кількість станцій каршерінгу не планується збільшувати, тому вона буде постійною і дорівнюватиме трьом

$$n_{\text{ст}} = \text{const}, \quad (2)$$

При плануванні витрат закладено, що витрати на закупівлю рухомого складу не мають перевищувати 7 500 000 грн., тому:

$$B_{\text{авт}} \leq 7500000 \text{ грн.} \quad (3)$$

Витрати від простою автомобіля на каршерінгових станціях та від доставки автомобілів до каршерінгових станцій не можуть перевищувати чистий прибуток компанії, що запускає сервіс.

$$B_{\text{д}}, B_{\text{пр}} \leq \Pi_{\text{чист}}. \quad (4)$$

Математична постановка задачі. Для визначення загальної суми витрат, задіяних на впровадження каршерінгу в Україні, по-перше, треба зазначити, що всі витрати можна поділити на дві групи – капітальні витрати, тобто витрати які з'являються на початку комерційної діяльності підприємства, та витрати експлуатаційні – це витрати, які з'являються за час роботи компанії. Тож, для визначення капітальних (початкових) витрат використовується формула:

$$C_{\text{поч}} = C_{\text{авт}} + C_{\text{станц}} + C_{\text{інф}} + C_{\text{марк}}, \text{ грн.}, \quad (5)$$

де $C_{\text{авт}}$ – витрати на закупівлю автомобілів, грн.;

$C_{\text{станц}}$ – витрати на облаштування станцій каршерінгу, грн.;

$C_{\text{інф}}$ – витрати на облаштування інформаційного забезпечення: система обліку, технічна підтримка, GPS-трекінг, розробка застосунку, тощо, грн.;

$C_{\text{марк}}$ – витрати, пов'язані з маркетингом, тобто витрати на рекламні кампанії, грн.

Для визначення експлуатаційних витрат використовується формула:

$$C_{\text{експл}} = C_{\text{обсл}} + C_{\text{страх}} + C_{\text{ПММ}} + C_{\text{з.п.}} + C_{\text{аморт}}, \text{ грн} \quad (6)$$

де $C_{\text{обсл}}$ – витрати на технічне обслуговування автомобілів, грн.;

$C_{\text{страх}}$ – страхові витрати на автопарк, грн.;

$C_{\text{ПММ}}$ – витрати на паливо (або зарядку для електрокарів) та мастильні матеріали, грн.;

$C_{\text{з.п.}}$ – витрати на заробітну платню персоналу компанії, грн.;

$C_{\text{аморт}}$ – амортизаційні витрати автомобілів, грн.

Загальні витрати за період, наприклад, рік, визначаються як:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{поч}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{експл}}, \text{ грн.} \quad (7)$$

де n – кількість облікових періодів (зазвичай, місяців або років).

Для визначення операційних доходів каршерінгового підприємства маємо:

$$D = T_{\text{хв}} \cdot N_{\text{хв}} + T_{\text{год}} \cdot N_{\text{год}} + T_{\text{доб}} \cdot N_{\text{доб}}, \text{ грн.} \quad (8)$$

де $T_{\text{хв}}$ – тариф похвилинний, грн./хв.;

$T_{\text{год}}$ – тариф погодинний, грн./год.;

$T_{\text{доб}}$ – тариф подобовий, грн./доба.;

$N_{\text{хв}}$ – кількість хвилин оренди, хв.;

$N_{\text{год}}$ – кількість годин оренди, год.;

$N_{\text{доб}}$ – кількість діб оренди, діб.

Вибір місця розташування каршерінгових станцій. Запропоноване місцерозташування каршерінгових станцій, що пропонується з огляду на щільність населення районів міста, доступність до головних транспортних вузлів, зображено на рисунку 3.

Автовокзал Тернополя є одним із найбільш доцільних місць для розташування станції каршерінгу завдяки своїй ключовій ролі в транспортній системі міста. Щодня через автовокзал проходять тисячі пасажирів, що створює стабільний потік потенційних користувачів послуг каршерінгу. Важливість цього вузла підсилюється тим, що він обслуговує не лише міські маршрути, а й приміські та міжміські. Саме тому автовокзал є раціональним місцем для впровадження каршерінгу, адже він є пасажироутворюючим та пасажиропоглинаючим пунктом.

Наявність біля автовокзалу супермаркету Novus підвищує привабливість каршерінгу. Також слід відзначити близькість розташування такої станції до центрального ринку Тернополя, який є одним з найбільших в місті. Наявність таких пасажироутворюючих місць збільшить попит на такий вид оренди транспорту, що дозволить зменшити термін окупності каршерінгу.

Близькість розташування каршерінгової станції до зупинки громадського транспорту дозволить інтегрувати її у транспортну мережу міста. Пасажири, у яких час на очікування громадського транспорту обмежений, можуть легко перейти на каршерінг, що забезпечить гнучкість у виборі маршрутів. Таким чином, розташування станції каршерінгу на автовокзалі Тернополя створює зручний, багатофункціональний транспортний вузол, що сприятиме зростанню попиту на послуги каршерінгу серед мешканців і гостей Тернополя. Запропоноване розташування станції каршерінгу наведено на рисунку 4.



Рисунок 3 – Місцезорозташування каршерінгових станцій

Джерело: розроблено авторами з використанням GoogleMaps

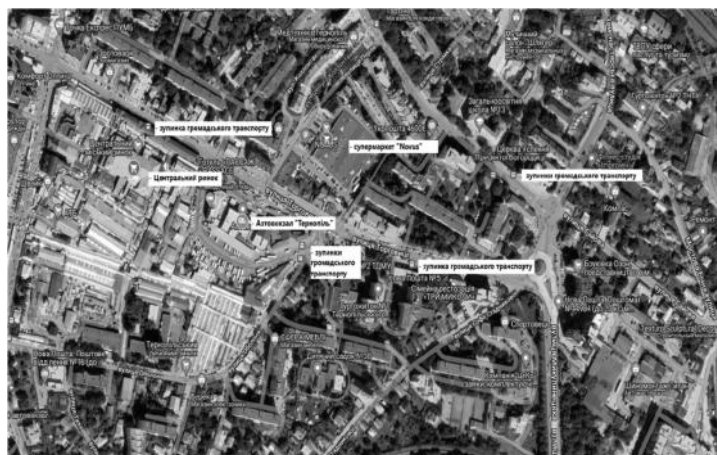


Рисунок 4 – Запропоноване розташування станції каршерінгу в районі автовокзалу

Джерело: розроблено авторами з використанням GoogleMaps

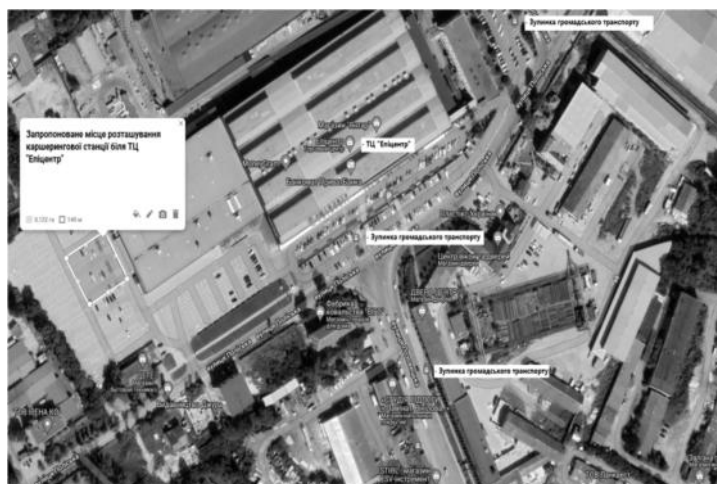


Рисунок 5 – Запропоноване місцезорозташування каршерінгової станції біля ТЦ «Епіцентр»

Джерело: розроблено авторами з використанням GoogleMaps

Для розташування другої каршерінгової станції пропонується обрати торговельний центр «Епіцентр» по вулиці Поліській, 7, що знаходиться у промисловому районі міста. «Епіцентр» є одним із найбільших торговельних центрів Тернополя, має велику кількість відвідувачів, які здійснюють покупки. Таке розташування каршерінгової станції буде зручним для відвідувачів торговельного центру, які

приїжджають із передмість чи віддалених районів Тернополя. Друга каршерінгова станція може розміщуватись безпосередньо на парковці торговельного центру, що забезпечить швидкий доступ до орендних автомобілів. Запропоноване місцезоташування каршерінгової станції наведено на рисунку 5.

З огляду на критерії вибору місцезоташування каршерінгових станцій, пропонується третю станцію розмістити біля залізничного вокзалу Тернополя. Вибір обумовлюється наявністю значного пасажиропотоку. Щодня вокзал приймає велику кількість пасажирів як із інших міст, так і з передмість, створюючи стабільний потік потенційних користувачів каршерінгових послуг. Каршерінг виступить альтернативою таксі або громадському транспорту. Пасажири зможуть обирати найбільш зручний варіант для конкретної поїздки. Таке розташування сприяє розвитку концепції мультимодального транспорту, коли громадський транспорт, каршерінг та інші сервіси доповнюють один одного. Запропоноване місце розташування каршерінгових станцій наведено на рисунку 6.

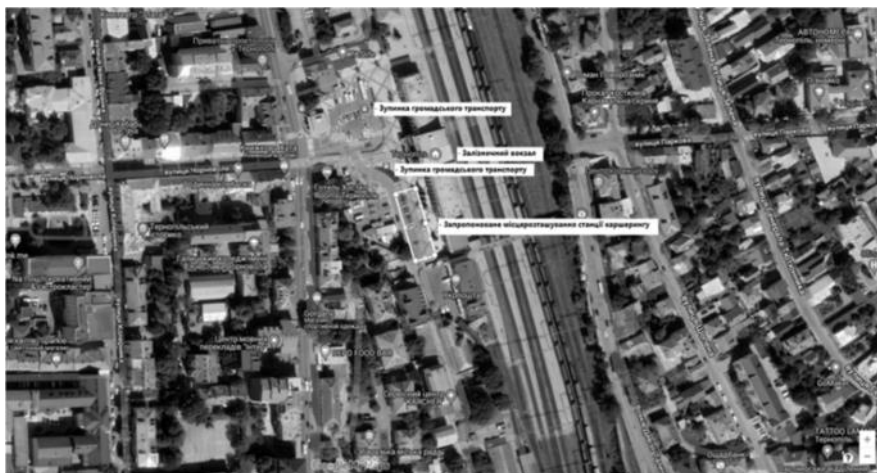


Рисунок 6 – Запропоноване розташування станції каршерінгу в районі залізничного вокзалу
Джерело: Джерело: розроблено авторами з використанням GoogleMaps

Висновки. Впровадження каршерінгу у міських умовах, зокрема у місті Тернопіль, є перспективним рішенням, що може суттєво покращити транспортну ситуацію, знизити рівень заторів і сприяти екологічному розвитку. В той же час залишається ряд проблем, які потребують ретельного вирішення, такі як недостатня кількість автомобілів у віддалених районах міст, проблема з інфраструктурою зарядок електричних автомобілів, а також безпека та страхування. Для впровадження каршерінгу необхідно розробити ефективну тарифну політику, забезпечити наявність спеціальних паркувальних зон та адаптувати нормативно-правову базу для підтримки цього виду сервісу.

Проведений аналіз показує, що місто Тернопіль має всі необхідні передумови для впровадження каршерінгової системи, враховуючи такі характеристики району обслуговування як площа, щільність населення та транспортну мобільність населення. Для реалізації проекту з запуску системи каршерінгу в м. Тернопіль запропоновано місця розташування станцій поблизу основних транспортних вузлів міста, таких як автовокзал, торговий центр «Епіцентр» та залізничний вокзал.

Методика оцінки витрат на впровадження каршерінгу охоплює такі статті витрат, як закупівля автопарку, витрати на інфраструктуру (пункти зарядки,

паркування), витрати на технічне обслуговування та страхування автомобілів, а також витрати на розробку та підтримку програмного забезпечення для управління системою. Змінними моделі витрат на впровадження каршерінгу є кількість станцій каршерінгу, кількість рухомого складу каршерінгу та коефіцієнт, що враховує недовикористання провізних можливостей автопарку. Крім цього слід врахувати амортизацію автомобілів, операційні витрати, витрати на управління сервісом, маркетингові витрати на залучення користувачів, а також потенційні ризики, що можуть виникнути через зміни в попиті або зовнішньому середовищі.

Попит на каршерінг для даного району залишається невизначеним і потребує уточнення. Для оцінки попиту на даний сервіс в подальшому планується проведення анкетування мешканців міста щодо частоти здійснення поїздок, рівня витрат на пересування, готовності користуватися каршерінгом. Визначення сегменту ринку дозволить промодельовувати роботу сервісу з урахуванням потреб користувачів, оцінити можливий рівень використання автопарку, встановити його пікові години та спрогнозувати ефективність проєкту для м. Тернопіль.

Список літератури

1. Growing Awareness of Peer-to-Peer Carsharing Will Boost Carsharing Rentals in Less Populated Areas in Europe: Frost & Sullivan. URL: <http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=265313501> (дата звернення: 23.02.2025).
2. Каршерінг. Germancar : веб-сайт. URL: <https://getmancar.com/uk/dnipro/carsharing> (дата звернення: 04.03.2025).
3. Elliot Martin, Susan Shaheen. Greenhouse Gas Emission Impacts of Carsharing in North America. URL: <https://tsrc.berkeley.edu/publications/greenhouse-gas-emission-impacts-carsharing-north-america> (дата звернення: 23.02.2025).
4. Shaheen Susan A., Cohen Adam, Farrar Emily. Carsharing's impact and future. URL: https://www.researchgate.net/publication/337003190_Carsharing's_impact_and_future (дата звернення: 28.02.2025).
5. Fan Zhou, Zuduo Zheng, Jake Whitehead. Examining the impact of car-sharing on private vehicle ownership. URL: https://www.researchgate.net/publication/342363079_Examining_the_impact_of_car-sharing_on_private_vehicle_ownership (дата звернення: 27.02.2025).
6. Jung J., Koo Y. Analyzing the Effects of Car Sharing Services on the Reduction of Greenhouse Gas (GHG) Emissions. *Sustainability*. 2018. 10(2). 539.
7. Riccardo Boin, Andrea Ricotti, Nicola Sandri, Timo Möller, Vadim Pokorilo. Infrastructure technologies: Challenges and solutions for smart mobility in urban areas. URL: <https://ru.scribd.com/document/875059451/Infrastructure-Technologies-Challenges-and-Solutions-for-Smart-Mobility-in-Urban-Areas-Copy> (дата звернення: 28.02.2025).
8. Shaheen Susan A., Sperling Daniel, Wagner Conrad. A Short History of Carsharing in the 90's. URL: https://www.researchgate.net/publication/254396812_A_Short_History_of_Carsharing_in_the_90's (дата звернення: 28.02.2025).
9. Zhenfeng Liu, Yujie Wang, Jian Feng. Coping with Spatial Mismatch: Vehicle-type strategies for manufacturer's car sharing. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3336398 (дата звернення: 28.02.2025).
10. Hensher David A., Nelson John D., Mulley Corinne. Electric car sharing as a service (ECSaaS) – Acknowledging the role of the car in the public mobility ecosystem and what it might mean for MaaS as eMaaS? URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/trapol/v116y2022icp212-216.html> (дата звернення: 28.02.2025).

References

1. Growing Awareness of Peer-to-Peer Carsharing Will Boost Carsharing Rentals in Less Populated Areas in Europe: Frost & Sullivan. (n.d.). www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=265313501 (accessed: 23.02.2025).
2. Karsherynh. Germancar: website. (n.d.). <https://getmancar.com/uk/dnipro/carsharing> (accessed: 04.03.2025) [in Ukrainian].

3. Martin, E., & Shaheen, S. (n.d.). Greenhouse gas emission impacts of carsharing in North America. <https://tsrc.berkeley.edu/publications/greenhouse-gas-emission-impacts-carsharing-north-america> (accessed: 23.02.2025).
4. Shaheen, S. A., Cohen, A., & Farrar, E. (n.d.). Carsharing's impact and future. https://www.researchgate.net/publication/337003190_Carsharing's_impact_and_future (accessed: 28.02.2025).
5. Zhou, F., Zheng, Z., & Whitehead, J. (n.d.). Examining the impact of car-sharing on private vehicle ownership. https://www.researchgate.net/publication/342363079_Examining_the_impact_of_car-sharing_on_private_vehicle_ownership (accessed: 27.02.2025).
6. Jung, J., & Koo, Y. (2018). Analyzing the effects of car sharing services on greenhouse gas (GHG) emissions. *Sustainability*, 10(2), 539.
7. Boin, R., Ricotti, A., Sandri, N., Möller, T., & Pokotilo, V. (n.d.). Infrastructure technologies: Challenges and solutions for smart mobility in urban areas. <https://ru.scribd.com/document/875059451/Infrastructure-Technologies-Challenges-and-Solutions-for-Smart-Mobility-in-Urban-Areas-Copy> (accessed: 28.02.2025).
8. Shaheen, S. A., Sperling, D., & Wagner, C. (n.d.). A short history of carsharing in the 90's. https://www.researchgate.net/publication/254396812_A_Short_History_of_Carsharing_in_the_90's (accessed: 28.02.2025).
9. Liu, Z., Wang, Y., & Feng, J. (n.d.). Coping with spatial mismatch: Vehicle-type strategies for manufacturer's car sharing. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3336398 (accessed: 28.02.2025).
10. Hensher, D. A., Nelson, J. D., & Mulley, C. (2022). Electric car sharing as a service (ECSaaS) – Acknowledging the role of the car in the public mobility ecosystem and what it might mean for MaaS as eMaaS? <https://ideas.repec.org/a/eee/trapol/v116y2022icp212-216.html> (accessed: 28.02.2025).

Kateryna Kovtsur, Assoc. Prof., PhD, **Illia Olenchuk**

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Carsharing as a Tool for Sustainable Urban Mobility Development (a Case Study of Ternopil)

The purpose of this article is to study the possibilities of introducing carsharing as an effective tool for the development of sustainable urban mobility in Ukrainian cities, using Ternopil as a case study. The research aims to identify the key factors influencing the successful functioning of carsharing systems, to develop an approach for assessing the costs of their implementation, and to propose optimal locations for carsharing stations within the city's transport network. Particular attention is paid to reducing environmental impacts, decreasing the number of private cars, and increasing the efficiency of urban land use.

The article analyzes current trends in the development of the carsharing market in Ukraine and worldwide, defines the main organizational models (Free-floating, Peer-to-peer, Fractional), and assesses their potential adaptation to the conditions of Ukrainian cities. A systematic review of scientific studies confirms the feasibility of integrating carsharing with public transport and highlights the potential of using electric vehicles to reduce CO₂ emissions. A mathematical formulation of the problem of cost estimation for launching and operating a carsharing company is developed, covering both initial and operational expenses related to vehicle procurement, station setup, technical maintenance, insurance, and marketing. Optimal locations for carsharing stations in Ternopil (the bus terminal, the "Epicenter" shopping mall, and the railway station) are proposed, taking into account passenger flows, population density, and integration with the city's transport network. The presented calculations confirm the economic efficiency of this model, as well as its ecological and social significance.

The findings indicate that the introduction of carsharing can significantly improve the transport situation in Ternopil, reduce traffic congestion, and enhance the quality of life of residents. It was established that one carsharing vehicle can replace up to 10–15 private cars, which reduces the load on road infrastructure and lowers harmful emissions. The study demonstrates that the most promising direction of development is the use of electric vehicles in carsharing fleets, which aligns with the concepts of "smart city" and sustainable development. For effective implementation of carsharing, it is necessary to ensure the financial affordability of the service, create a supportive regulatory framework, and provide integration with other modes of urban transport.

carsharing, urban mobility, sustainable development, carsharing station, transport infrastructure

Одержано (Received) 05.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 22.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

УДК 656.072

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.331-340](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.331-340)

С. А. Сахно, Є. В. Любий, доц., канд. техн. наук, **О. С. Колій**, канд. техн. наук
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
e-mail: kolioleksandr@gmail.com

Аналіз стратегій формування маршрутних мереж міст

Ключовою метою статті є проведення аналітичного огляду сучасних стратегій формування міських пасажирських маршрутних мереж. Результати аналізу сучасних практик побудови пасажирських маршрутних мереж спрямовані на удосконалення існуючих методів формування ефективних транспортних систем українських міст з урахуванням специфіки транспортного обслуговування населення громадським транспортом.

громадський транспорт, маршрутна мережа, пасажирські перевезення, транспортна система

Постановка проблеми. Ефективне функціонування міської транспортної системи є одним із ключових чинників сталого розвитку міста. В умовах зростаючої урбанізації, щоденне переміщення мільйонів пасажирів потребує чітко організованої, зручної та гнучкої маршрутної мережі (ММ), яка здатна задовольнити запити населення, мінімізувати витрати ресурсів і негативний вплив на довкілля. Особливої актуальності це питання набуває у середніх і великих містах, де інтенсивність транспортних потоків зростає, а просторове розширення міської території створює додаткові виклики.

ММ є основою організації пасажирських перевезень і визначає не лише географію доступності, а й рівень соціальної інтеграції, мобільності населення, ефективності використання транспортних засобів. Саме тому планування ММ виходить за межі виключно інженерного завдання і включає в себе комплексний аналіз соціально-економічних, географічних, екологічних і поведінкових чинників [1].

На сьогодні у різних країнах світу застосовуються різноманітні підходи до формування ММ – від традиційних радіально-кільцевих систем до складних багаторівневих моделей, побудованих на основі великих масивів даних (big data) з використанням інструментів транспортного моделювання (Visum, TransCAD та ін.). Успішні кейси європейських столиць, а також деяких українських обласних центрів, демонструють різні підходи до адаптації ММ до змін у міській структурі та потребах населення у мобільності [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найчастіше під міською ММ розуміють сукупність ліній усіх систем громадського транспорту (ГТ), які забезпечують переміщення пасажирів між різними районами міста. ММ включає: геометричну конфігурацію маршрутів, пункти пересадок, зупиночні пункти, зони охоплення (зони пішої доступності), часові характеристики руху (частота, регулярність) [1-4].

Ключовими цілями на різних етапах планування і формування ММ можна вважати: максимальне покриття міської території, скорочення часу поїздки ГТ та/або часу на пересування в ММ та кількості пересадок, оптимізацію завантаження транспортних засобів, забезпечення доступності для соціально вразливих груп населення, інтеграцію з іншими видами транспорту, наприклад, велосипедним, залізничним, авіаційним [1, 2].

Основні принципи формування ММ полягають у наступному [1, 3]:

- спрямованість на попит. Планування має базуватися на аналізі фактичного і прогнозованого пасажиропотоку, дані про який отримуються за рахунок проведення регулярних досліджень або ж з автоматизованих систем його обліку;
- системність. Маршрути повинні утворювати єдину логічну систему, спрямовану на ефективне і якісне задоволення потреб населення у пересуванні;
- гнучкість. Мережа повинна адаптуватися до змін у забудові, населенні, економіці і мати резерви для удосконалення;
- раціональність. Мінімізація дублювання маршрутів і неефективних ділянок.

Існують різні типи конфігурацій ММ, серед яких найпоширенішими можна вважати наступні [5]: радіально-кільцева модель, лінійно-коридорна (магістральна), грід (решіткова модель), гібридна мережа.

Перший тип ММ є характерним для великих міст з історичним центром, в яких центральна зона охоплюється кільцевими маршрутами, від яких радіально відходять лінії у віддалені райони. Другий тип ММ будується навколо головних транспортних коридорів із високою пропускнуою здатністю і часто використовується в системах Bus Rapid Transit (BRT). За умов використання третього типу ММ маршрути формуються у вигляді прямокутної сітки з пересадками на перехрестях, забезпечуючи при цьому рівномірне покриття міської території. Четвертий тип ММ поєднує кілька моделей для досягнення балансу між покриттям та ефективністю і часто зустрічається у європейських містах.

Для оцінювання ефективності діючих і пропонованих варіантів ММ може бути використаний достатньо широкий перелік критеріїв, ключовими з яких є [1, 2, 6, 7]:

- показники доступності, найчастіше представляється як відсоток населення, що мешкають в зоні пішої доступності до зупинок ГТ або через середню відстань підходу пасажирів до зупинки;
- показники якості транспортного обслуговування: середній час поїздки або пересування; середня відстань пересування пасажирів, коефіцієнт пересадочності (частка поїздок із пересадками), час очікування;
- показники фінансової ефективності: рівень окупності витрат, прибуток;
- показники екологічної ефективності, наприклад, кількість викидів CO₂ на 1 пасажиро-кілометр.

Слід також розуміти, що сучасні підходи до планування ММ повинні ґрунтуватися на використанні передових технологій, які використовуються для моніторингу трафіку у містах (глобальна навігаційна супутникова система, GPS), обліку поїздок пасажирів у ГТ, наприклад, Smart Card Data, геоаналітики і моделювання ММ (геоінформаційні системи, GIS, програмні продукти транспортного моделювання), оптимізації маршрутів у режимі реального часу (різноманітні мобільні додатки для відстежування транспорту і планування поїздок). Але на даному етапі більшість з цих технологій не є доступними для українських міст через поєднання фінансових, інституційних, технічних і соціальних бар'єрів. Тут можна відзначити, що переважна кількість українських міст стикається з браком фінансування розвитку ГТ, яке значною мірою залежить від державних субвенцій, що стає перепорою на шляху закупівлі та використання інформаційних комплексів GPS-моніторингу ГТ, автоматизованих систем обліку пасажиропотоків, ліцензійного програмного забезпечення для транспортного моделювання. Слід також відзначити й недостатній рівень цифрової інтеграції між перевізниками, органами місцевого самоврядування і державними реєстрами, що створює додаткові проблеми з обміном, верифікацією і стандартизацією інформації про результати роботи ГТ. Стосовно технічної інфраструктури багатьох українських міст слід розуміти, що на даний час вона не

готова до безперервної роботи таких систем через нестабільний мобільний зв'язок на периферії, застарілий рухомий склад без сучасних бортових систем і відсутність локальних центрів обробки даних. До наведеного вище слід також додати інституційну інерцію та низьку культуру використання даних у плануванні ГТ як з боку чиновників, так і приватних перевізників, що гальмує перехід до аналітично-орієнтованого управління. А низька цифрова грамотність частини населення та обмежене поширення транспортних карт знижують ефективність таких рішень, як мобільні додатки для оптимізації маршрутів чи автоматизований облік поїздок. У сукупності ці фактори зумовлюють фрагментарність і точковість впровадження інновацій, що значно відрізняє українську практику від провідних світових прикладів [1].

Постановка завдання. Метою статті є аналіз існуючих стратегій формування ММ у містах на основі порівняння української практики з міжнародним досвідом, з акцентом на ефективність, адаптивність і сталість розроблених рішень. Результати даного дослідження повинні стати одним із перших кроків на етапі розробки методології формування принципів і стратегій удосконалення ММ з урахуванням провідного світового досвіду та специфіки українських міст.

Виклад основного матеріалу. Слід почати з розгляду ключових українських і світових практик формування ММ та їхнього порівняння з урахуванням специфіки цих міст.

Київ має радіально-кільцеву модель ММ (рисунок 1), де центр міста і радіальні напрямки переважно обслуговуються різними системами ГТ: метро, трамваї, тролейбуси, кільцева електричка, автобуси, а також маршрутні таксі (маршрутки), що сполучають віддалені райони з центром і між собою. За даними дослідження Світового Банку (Sustainable Urban Transport for Kyiv) 94 % населення міста проживає у межах 400 м до зупинки ГТ, що свідчить про високий рівень покриття ММ міської території [8].



Рисунок 1 – Фрагмент ММ міста Києва (мережа маршрутів метро і кільцевої електрички)

Джерело: розроблено з використанням <https://www.eway.in.ua/ua/cities/kyiv/>

Водночас одним із ключових викликів для столиці є затори й уповільнення руху маршрутного транспорту. Дослідження щодо пріоритизації руху ГТ у Львові показують, що просторово-часова пріоритизація здатна значно скоротити затримки до рівня, коли визначальним критерієм стає не кількість транспортних засобів, а кількість перевезених людей [9, 10]. У Києві такі підходи тільки починають впроваджуватися.

Маршрутні таксі грають помітну роль у ММ столиці. За даними ресурсу EasyWay [11] станом на початок серпня 2025 року у місті функціонує 96 маршрутів з автобусами середньої та малої місткості, що забезпечують додаткову гнучкість, але створюють дублювання маршрутів і проблеми з інтеграцією до комунального транспорту.

У свою чергу, Львів має компактну і густонаселену територіальну структуру, що у два рази перевищує щільність міст-порівнянь, таких як Лейпциг або Краків [12]. Це обмежує можливість розширення дорожніх магістралей для автомобільного транспорту й породжує потребу у розвитку саме громадського та екологічного електротранспорту.

Львівелектротранс – комунальне підприємство, яке обслуговує місто з мережею з 8 трамвайних і 10 тролейбусних маршрутів (станом на початок серпня 2025 р.) [13]. На рисунку 2 представлено схеми маршрутів електротранспорту міста Львів.



Рисунок 2 – Конфігурація ММ електротранспорту міста Львів: а – трамвай, б – тролейбус
Джерело: розроблено з використанням <https://www.eway.in.ua/ua/cities/lviv>

У статті [14] представлені результати оцінювання ефективності функціонування ММ міста Львів станом на 2020 рік, де зазначено, що:

- оптимальна тривалість поїздки в ГТ складає 15–45 хвилин (77 % поїздок);
- поїздки відбуваються у комфортних умовах – заповнення салону транспортних засобів не перевищує 80 %;
- довжина пішого підходу до зупинок ГТ не перевищує 600 м для 84 % користувачів ГТ.

Київ демонструє класичний приклад централізованої ММ з інфраструктурою метро та розгалуженою мережею маршрутних автобусів. Висока доступність транспорту, але недостатнє управління рухом призводить до зниження швидкості перевезень.

ММ Львова характеризується компактною структурою, що обмежує можливості капітальних змін в інфраструктурі, але стимулює розвиток електротранспорту та

використання пріоритизації. Основні виклики – комфортність пересадок, інтеграція з іншими видами транспорту, оптимізація маршрутів згідно з попитом.

Спільним для обох міст є необхідність активнішої інтеграції сучасних ІТ-технологій, GPS, GIS-моделей і мобільних додатків для глибшого аналізу попиту й адаптивного планування ММ. Результати порівняльного аналізу ММ міста Київ і Львів представлені у таблиці 1.

Щодо кращих європейських практик, то тут необхідно відзначити «модель Цюриха». Місто підтримує один із найвищих показників користування ГТ. Це відбувається завдяки інтегрованій структурі маршрутів (трамваї, автобуси, S-Bahn, човни, фунікулери), високій частоті руху й системі тарифів. ММ проста в користуванні, з великою кількістю інформаційних табло і зручною навігацією. Квитки на ГТ коштують недешево, але вони дозволяють користуватися всіма видами транспорту в межах визначеної зони [15].

Прикладом інтеграції мульти-модальних систем є Діжон, Франція. Система ГТ Діжона, що включає трамваї, автобуси й велосипеди, ефективно знизилася частку приватного автотранспорту та зменшила затори. Єдиний оператор забезпечує координацію всіх видів ГТ, уніфіковані тарифи й спільне брендуння, що підвищує зручність і привабливість для пасажирів.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз ММ міст

Характеристика	Київ	Львів
Структура мережі	Радіально-кільцева + масив маршрутних автобусів	Компактна радіальна/кільцева + потужний електротранспорт
Покриття	94 % населення в межах 400 м від зупинки ГТ	Високе покриття, але піший підхід до 600 м
Пріоритизація	Обмежена реалізація	Сегментація доріг для часової пріоритизації маршрутів
Системи транспорту	Метро, трамвай, тролейбус, автобус, маршрутні автобуси	Трамвай, тролейбус, автобуси високої місткості, маршрутні автобуси
Інформаційні технології	Часткова інтеграція GPS-даних та результатів транспортного моделювання	Активне використання мобільних додатків і GPS-аналітики. Моделювання на мікро- та макрорівнях: Vissim, Visum

Шляхом розвитку сталої мобільності пішов Копенгаген. Хоча й ключова увага приділяється велосипедній інфраструктурі, рішення Копенгагену у плануванні міської мобільності включають також інтенсивне використання ГТ, наприклад, автобусів і трамваїв. Місто поєднує інфраструктурні, регуляторні та популяризаційні заходи, створюючи умови, де понад 68 % мешканців використовують велосипед принаймні раз на тиждень, а реалізована стратегія сприяє зменшенню автомобілеорієнтованих поїздок [16].

Результати аналізу 24 середніх міст Скандинавії показують, що вони переходять до ієрархічної структури ММ: високочастотні магістральні лінії вузлових маршрутів (trunk-routes) доповнюються крос- і фідерними маршрутами. Планування ММ фокусується на простоті мережі, гнучкості структури, зниженні витрат та адаптації до попиту [17].

На прикладі Риму, Італія було запропоновано нову методику формування мережі автобусних маршрутів, яка дозволяє враховувати коливання попиту з точки зору планування [18]. У дослідженні було застосовано мобільні дані для створення кандидатів маршрутів, а також оптимізовано мережу автобусних маршрутів з

урахуванням прямих сполучень та часу поїздки. Також враховано гнучке реагування на перевищення попиту – з використанням змішаних маршрутів та адаптивної частоти.

У свою чергу, у дослідженні щодо оптимізації автобусної мережі Барселони доведено, що оптимальна конфігурація мережі може знизити загальні системні витрати на 17 %, а викиди CO₂ – на 50 %, без зниження рівня обслуговування пасажирів [19]. Такі результати демонструють економічну та екологічну вигоду від грамотного дизайну ММ.

Стосовно інших кращих світових практик, то слід відзначити класику BRT – Курітіба, Бразилія. Система Curitiba BRT, яка обслуговує 85 % населення міста (близько 2–3 мільйони пасажирів на день), є прикладом добре продуманої фідерної і магістральної мережі з виділеними смугами, платформами з оплатою перед посадкою в транспортний засіб, урізаними часами зупинок і виділеними смугами для швидкісних маршрутів. Підхід Curitiba став моделлю для десятків інших міст світу, включаючи азійські мегаполіси [20].

Сучасний BRT на основі великого міста – це система Cairo BRT, що розташована вздовж кільцевої дороги Каїру, Єгипет, включає 48 станцій і 100 електробусів, які працюють цілодобово із середнім інтервалами близько 10 хв. Вона інтегрована з іншими видами ГТ, застосовує оплату перед посадкою, ескалатори, підземні переходи й паркінги біля станцій – класичний приклад сучасної BRT-інфраструктури в мегаполісі [21].

Ієрархічні та модульні структури (Цюріх, скандинавські міста) забезпечують баланс між частотою маршрутів та їх зрозумілістю для пасажирів. BRT-підходи (Курітіба, Каїр) можна цілком вважати інструментом для достатньо швидкого масштабування системи ГТ з високим охопленням територій міста і швидкістю сполучення. Використання методів орієнтованих на попит, а також адаптивний дизайн (Барселона, Рим) дозволяють оптимізувати ММ з урахуванням інформації про фактичні або прогнозовані потреби у перевезенні. А застосування мульти-модальних моделей (Діжон, Копенгаген) сприяє підвищенню привабливості систем ГТ за рахунок налагодження взаємодії різних систем міського пасажирського транспорту.

За результатами попереднього аналізу закордонного досвіду формування міських ММ можна цілком стверджувати, що застосовані підходи характеризуються системністю і базуються на наступних принципах:

- ієрархічна структура. Магістральні → фідерні → локальні маршрути;
- системність у плануванні всього міського простору з транспортом як «основою мобільності»;
- оптимізація за критеріями часу поїздки/пересування, частоти/інтервалу руху, вартості обслуговування та/або інших;
- застосування цифрових інструментів для аналізу попиту та моделювання мережі.

В українській практиці у більшості міст домінують радіально-коридорні моделі, без повноцінної ієрархії маршрутів, наявне накладання маршрутів, дублювання руху та слабка логістична оптимізація, відсутнє централізоване програмне моделювання попиту, мережі формуються не за планом, а як реакція на приватну ініціативу чи спонтанний попит, часто відсутня інтеграція між видами транспорту, наприклад, автобусна мережа не доповнює електротранспорт, а дублює його [1].

Слід відзначити широку практику застосування транспортного моделювання для планування і удосконалення ММ іноземних міст (PTV Visum, TransCAD, SUMO), використання мобільних даних (CDR, GPS) та опрацювання big data у реальному часі. Все це дає змогу визначати актуальні транспортні і пасажиропотоки, створювати

оптимальні й адаптивні маршрути, а також швидко реагувати на зміни поведінки пасажирів.

В Україні застосування подібних систем фрагментарне. Навіть у великих містах аналітика не є частиною системного процесу планування. Часто оновлення ММ базується на інтуїції, зверненнях громадян або конфліктних ситуаціях (переповненість, аварійність).

Слід також відзначити, що на відміну від країн ЄС, де є чітка вертикаль стратегічного планування (національні – регіональні – муніципальні стратегії з інтегрованим управлінням мобільністю), в Україні відсутня чітка інтеграція заходів для підвищення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту:

- державна політика з транспортного планування слабо впроваджена на місцях;
- міста не зобов'язані створювати плани сталої міської мобільності (SUMP), а якщо створюють – часто це проекти, що залишаються нереалізованими.

Узагальнена характеристика вітчизняної і закордонних практик щодо формування ММ представлена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Узагальнена характеристика практик формування ММ

Критерій	Україна	Іноземні практики
Модель формування	Реактивна, децентралізована	Стратегічна, централізована
Тип структури мережі	Коридорно-радіальна, хаотична	Ієрархічна, оптимізована
Використання даних	Мінімальне або відсутнє	Широке застосування big data
Інтеграція видів транспорту	Слабка	Сильна
Роль приватного сектору	Визначальна	Допоміжна
Планування розвитку	Переважно ситуативне	Засноване на моделях і ключових показниках ефективності

Якщо розглядати питання формування міських ММ з позиції транспортного планування, то двома найпоширенішими стратегіями їх створення є стратегія основного маршруту та стратегія однієї пересадки [1, 6, 7]. Перша стратегія передбачає побудову мережі на основі кількох високопродуктивних магістральних маршрутів, які проходять головними транспортними коридорами міста. Такі маршрути за своєю конфігурацією найчастіше є діаметральними і створюють основний каркас ММ. Основними рисами таких маршрутів є висока частота руху транспортних засобів, використання транспортних засобів з великими провізними можливостями (трамваї, тролейбуси, метро) для задоволення основних потреб у пересуванні, наявність пріоритету в русі за рахунок різноманітних організаційно-технічних заходів. Для обслуговування міських територій, що знаходяться поза межами основних магістралей, розробляється система підвізних (радіальних та/або хордових) маршрутів, що використовується для перевезення пасажирів до пересадочних пунктів на основні маршрути. З технологічної точки зору основною перевагою стратегії основного маршруту є її направленість на швидке транспортне обслуговування віддалених транспортних районів міста, але з'являється необхідність у додатковій пересадці при здійсненні пересування [1, 6, 7].

На відміну від першої стратегії однієї пересадки орієнтується на мінімізацію кількості пересадок при здійсненні пересування. ММ будується так, щоб з будь-якої частини міста можна було дістатися до іншої, здійснивши не більше ніж одну пересадку. Це досягається завдяки ретельній синхронізації руху транспортних засобів

на маршрутах, які перетинаються у визначених транспортних вузлах. Ключовою рисою цієї стратегії є створення зручних умов для швидкої та комфортної пересадки. Транспорт має прибувати до вузла з різних напрямків у визначений час, що дозволяє пасажиром із мінімальним часом очікування здійснювати пересадку. Такий підхід особливо ефективний у містах із поліцентричною структурою або там, де попит рівномірно розподілений на території. Проте він вимагає високого рівня координації перевізників, точності дотримання розкладів і добре розвиненої інфраструктури пересадкових вузлів. У разі збоїв графіку руху порушується уся система пересадок, що може призводити до значних незручностей для пасажирів [1, 6, 7].

Обидві стратегії мають свої переваги і недоліки та можуть застосовуватися залежно від просторової структури міста, характеру транспортного попиту і пріоритетів у розвитку системи ГТ. Слід відзначити, що на практиці часто використовується поєднання обох стратегій, за рахунок чого формується потужна мережа основних маршрутів, яка поєднується з розгалуженою мережею підвізних. Такий підхід до організації роботи ММ забезпечує баланс між ефективністю перевезень і зручністю пересування для пасажирів.

Висновки. За результатами дослідження встановлено, що проблема побудови міських ММ є складним завданням, ефективне вирішення якого передбачає наявність інформації про існуючий попит на пересування пасажирів, розробку, на основі цих даних, моделей транспортного попиту, розробку загальної транспортної моделі системи ГТ міста, на основі якої можна здійснювати оцінку ефективності різних варіантів розвитку ММ.

Закордонний досвід побудови ММ ґрунтується на інтегрованих, багаторівневих підходах, в основу яких закладаються сучасні принципи просторового розвитку міст, результати постійного моніторингу змін у мобільності населення, актуальні екологічні виклики, а також нові інтелектуальні технології. На відміну від цього, українська практика формування ММ, на прикладі переважної більшості міст, є фрагментарною, орієнтованою на короткострокові потреби у пересуванні та обмежена за ресурсами. Все це призводить до дублювання маршрутів, перевантаження окремих напрямків, неефективного охоплення міських районів.

Відсутність довгострокової транспортної стратегії з чіткими цільовими показниками, відсутність планово-прогнозних інструментів (моделювання, аналізу попиту, оптимізації маршрутів), низький рівень фінансування ГТ, домінування приватного сектору, який не зобов'язаний працювати відповідно до суспільних інтересів, слабе впровадження міжнародних практик (SUMP, обґрунтоване субсидіювання) створюють суттєві проблеми для розвитку пасажирського транспорту в українських містах.

З огляду на глобальні тенденції, подальші дослідження повинні зосередитися на використанні штучного інтелекту та машинного навчання для моделювання попиту та проектування маршрутів, розвитку мультимодальних систем (інтеграція велосипедів, самокатів, каршерінгу), дослідженні поведінкових факторів при виборі маршруту та розробці адаптивних мереж у реальному часі – з можливістю зміни маршруту залежно від навантаження чи подій у місті.

Список літератури

1. Любий С. В., Свічинська О. В., Токмиленко Т. Т., Чижик В. М., Горбачов П. Ф., Свічинський С. В., Кочина А. А. Транспортні системи: актуальні проблеми планування, функціонування та аналізу : колективна монографія / за заг. ред. П. Ф. Горбачова. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2025. 262 с. <https://doi.org/10.61718/tsl2025m1>.

2. Чуйко С. П., Шумляківський В. П. Основні параметри і предмет розвитку маршрутної мережі автобусних міських перевезень. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. 33(72). С. 337–342. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/52>.
3. Горбачов П. Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01. Харків, 2009. 370 с.
4. Вдовиченко В. О. Методологічні основи формування системної ефективності громадського пасажирського транспорту в умовах сталого розвитку : монографія. Харків : ХНАДУ, 2017. 212 с.
5. Badia H. Comparison of Bus Network Structures in Face of Urban Dispersion for a Ring-Radial City. *Networks and Spatial Economics*. 2020. Vol. 20. P. 233–271. <https://doi.org/10.1007/s11067-019-09474-5>.
6. Аналіз діючої транспортної мережі м. Конотоп... : звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0121U112782. Харків, 2021. 124 с.
7. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька : звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.
8. Sustainable Urban Transport for Kyiv. Офіц. сайт Energy Sector Management Assistance Program. URL: <https://www.esmap.org/...> (дата звернення: 06.07.2025).
9. Yevchuk Yu. Speed of urban public transport as criterion of the justification of spatial and time-based prioritization. *Transport technologies*. 2024. Vol. 5(2). P. 33–41. <https://doi.org/10.23939/tt2024.02.033>.
10. Royko Yu., Yevchuk Yu., Bura R., Velhan A. Minimization of public transport delays at arterial streets with coordinated motion. *Transport technologies*. 2022. Vol. 3(1). P. 14–29. <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.014>.
11. Маршрутка. Офіц. сайт EasyWay. URL: <https://www.eway.in.ua/...> (дата звернення: 01.08.2025).
12. Liubyskyi R. Development of the transport network considering the specifics of Lviv's planning structure (compared to Leipzig and Krakow). *Architectural Studies*. 2023. Vol. 9(2). P. 58–71. doi:10.56318/as/2.2023.58.
13. Online-map. Офіц. сайт ЛКП «Львівавтодор». URL: www.let.org.ua/online-map (дата звернення: 01.08.2025).
14. Gits I., Zhuk M., Pivtorak H. Analysis of demand for public transport service in Lviv city. *Transport technologies*. 2020. Vol. 1(2). P. 57–64. <https://doi.org/10.23939/tt2020.02.057>.
15. Timetable & Information. Офіц. сайт ZVV. URL: <https://www.zvv.ch/...> (дата звернення: 03.08.2025).
16. Green Cities and Transportation. Офіц. сайт MavsOpenPress. URL: <https://uta.pressbooks.pub/...> (дата звернення: 03.08.2025).
17. Weckström C., Mladenović M. N. Evaluation of public transport policy formulation and implementation: Case study of 24 mid-sized Nordic cities. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 45. P. 979–986. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.068>.
18. Gemma A., Cipriani E., Crisalli U., Mannini L., Petrelli M. A Bus Network Design Model under Demand Variation: A Case Study of the Management of Rome's Bus Network. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. P. 803. <https://doi.org/10.3390/su16020803>.
19. Griswold J. B., Sztainer T., Lee J., Madanat S., Horvath A. Optimizing Urban Bus Transit Network Design Can Lead to Greenhouse Gas Emissions Reduction. *Frontiers in Built Environment*. 2017. Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00005>.
20. Brazil – Curitiba Urban Transport Project. Офіц. сайт Світового банку. URL: <https://documents.worldbank.org/> (дата звернення: 04.08.2025).
21. Egypt starts training Bus Rapid Transit drivers on Cairo's Ring Road. Офіц. сайт AhramOnline. URL: <https://english.ahram.org.eg/> (дата звернення: 04.08.2025).

References

1. Liubiyi, Ye. V., Svichynska, O. V., Tokmylenko, T. T., Chyzhyk, V. M., Horbachov, P. F., Svichynskyi, S. V., & Kochyna, A. A. (2025). *Transport Systems: Current Problems of Planning, Functioning and Analysis: Collective Monograph*. Kharkiv: SH NTM "Novyi Kurs". <https://doi.org/10.61718/tsl2025m1> [in Ukrainian].
2. Chuiko, S. P., & Shumliakivskyi, V. P. (2022). Main parameters and subject of development of the urban bus route network. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 33(72), 337–342. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/52> [in Ukrainian].
3. Horbachov, P. F. (2009). Concept of formation of route passenger transport systems in cities (Doctoral dissertation). Kharkiv [in Ukrainian].
4. Vdovychenko, V. O. (2017). Methodological foundations of forming the system efficiency of public passenger transport under sustainable development. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
5. Badia, H. (2020). Comparison of bus network structures in face of urban dispersion for a ring-radial city. *Networks and Spatial Economics*, 20, 233–271. <https://doi.org/10.1007/s11067-019-09474-5>.
6. Analysis of the existing transport network of Konotop... (2021). Final research report. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
7. Development of the comprehensive traffic scheme of Lutsk (2018). Final research report. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
8. Sustainable Urban Transport for Kyiv. (n.d.). *Energy Sector Management Assistance Program*. Retrieved July 6, 2025, from <https://www.esmap.org/...>

9. Yevchuk, Yu. (2024). Speed of urban public transport as criterion of the justification of spatial and time-based prioritization. *Transport Technologies*, 5(2), 33–41. <https://doi.org/10.23939/tt2024.02.033>.
10. Royko, Yu., Yevchuk, Yu., Bura, R., & Velhan, A. (2022). Minimization of public transport delays at arterial streets with coordinated motion. *Transport Technologies*, 3(1), 14–29. <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.014>.
11. Route taxi. (n.d.). *EasyWay*. Retrieved August 1, 2025, from [https://www.eway.in.ua/...](https://www.eway.in.ua/) [in Ukrainian].
12. Liubyskyi, R. (2023). Development of the transport network considering the specifics of Lviv's planning structure (compared to Leipzig and Krakow). *Architectural Studies*, 9(2), 58–71. <https://doi.org/10.56318/as/2.2023.58>.
13. Online map. (n.d.). *LKP "Lvivavtodor"*. Retrieved August 1, 2025, from <https://www.let.org.ua/online-map> [in Ukrainian].
14. Gits, I., Zhuk, M., & Pivtorak, H. (2020). Analysis of demand for public transport service in Lviv city. *Transport Technologies*, 1(2), 57–64. <https://doi.org/10.23939/tt2020.02.057>.
15. Timetable & Information. (n.d.). *ZVV*. Retrieved August 3, 2025, from [https://www.zvv.ch/...](https://www.zvv.ch/)
16. Green Cities and Transportation. (n.d.). *MavsOpenPress*. Retrieved August 3, 2025, from [https://uta.pressbooks.pub/...](https://uta.pressbooks.pub/)
17. Weckström, C., & Mladenović, M. N. (2020). Evaluation of public transport policy formulation and implementation: Case study of 24 mid-sized Nordic cities. *Transportation Research Procedia*, 45, 979–986. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.068>.
18. Gemma, A., Cipriani, E., Crisalli, U., Mannini, L., & Petrelli, M. (2024). A bus network design model under demand variation: A case study of the management of Rome's bus network. *Sustainability*, 16, 803. <https://doi.org/10.3390/su16020803>.
19. Griswold, J. B., Sztainer, T., Lee, J., Madanat, S., & Horvath, A. (2017). Optimizing urban bus transit network design can lead to greenhouse gas emissions reduction. *Frontiers in Built Environment*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00005>.
20. Brazil – Curitiba urban transport project. (n.d.). *World Bank*. Retrieved August 4, 2025, from <https://documents.worldbank.org/>.
21. Egypt starts training bus rapid transit drivers on Cairo's Ring Road. (n.d.). *AhramOnline*. Retrieved August 4, 2025, from <https://english.ahram.org.eg/>.

Sakhno Serhii, Yevhen Liubyi, Assoc. Prof., PhD in Engineering, **Kolii Oleksandr**, PhD in Engineering
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Analysis of Strategies for Developing Urban Route Networks

The article explores strategies for designing urban route networks with a focus on ensuring efficient, sustainable, and adaptive public transportation systems. The analysis is grounded in a comparative approach that examines the current practices in Ukrainian cities alongside leading international experiences. The paper outlines key principles of urban route network planning, including demand orientation, system coherence, flexibility, and rationality. Various network configurations – such as radial-ring, corridor-based, grid, and hybrid models – are reviewed, along with core efficiency indicators such as accessibility, service quality, financial viability, and environmental performance.

The route networks of Kyiv and Lviv are analyzed as case studies representing different spatial structures and transport planning challenges. Kyiv features a radial-ring model with extensive use of metro and private minibuses, while Lviv emphasizes electric transport and compactness. Despite relatively high network coverage in both cities, issues such as overlapping routes, limited integration across transport modes, and insufficient prioritization of public transit persist. These cases are contrasted with best practices from cities like Zurich, Copenhagen, Dijon, Barcelona, Curitiba, Rome, and Cairo, where route networks are developed through strategic, centralized planning, supported by digital modelling tools, big data analytics, and multimodal coordination.

The article concludes that urban transit planning in Ukraine remains largely reactive and fragmented, constrained by limited funding, outdated infrastructure, weak institutional capacity, and minimal use of data-driven tools. In contrast, international models demonstrate the benefits of hierarchical networks, integrated systems, and adaptive management based on performance metrics and mobility demand.

Future research should focus on implementing AI and machine learning for demand prediction and route optimization, integrating shared mobility modes (bikes, scooters, carsharing), analyzing behavioral patterns in passenger movement, and developing real-time adaptive networks capable of responding to dynamic urban conditions.

public transport, route network, passenger transport, transport system

Одержано (Received) 11.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ INFORMATION ABOUT AUTHORS

Алієв Ельчин Бахтияр огли - доктор технічних наук, старший дослідник, 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 - Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor 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.

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.

Aulin Viktor - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: aulinvv@gmail.com.

Бабій Андрій Васильович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6198-0100>, e-mail: avbabiyntu@gmail.com.

Andrii Babii - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Engineering Mechanics and Agricultural Machines Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6198-0100>, e-mail: avbabiyntu@gmail.com.

Байцан Віктор Григорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3519-9090>, e-mail: v.baitsan@landtech-ukraine.com.

Viktor Baitsan - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3519-9090>, e-mail: v.baitsan@landtech-ukraine.com.

Башуцький Михайло Романович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Mykhailo Bashutsky - PhD student in Road Transport, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Бевз Олег Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1606-2372> e-mail: oleg_bevz@ukr.net.

Bevz Oleh - 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/0000-0003-1606-2372> e-mail: oleg_bevz@ukr.net.

Бережна Наталія Георгіївна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і логістики, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8740-3387>, e-mail: bereg_nat@ukr.net.

Nataliia Berezhna - Associate Professor, PhD, Candidate of technical science, Associate Professor Department of Transport Technologies and Logistics, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8740-3387>, e-mail: bereg_nat@ukr.net.

Білий Олександр Володимирович - здобувач вищої освіти за спеціальністю «Прикладна механіка», НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1968-0993>, e-mail: oleksandr.bilyi-mp31@lil.kpi.ua.

Oleksandr Bilyi - student in Applied Mechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1968-0993>, e-mail: oleksandr.bilyi-mp31@lil.kpi.ua.

Бірючинський Віталій Віталійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Vitalii Biriuchinskyi - PhD student in Road Transport, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Блащак Богдан Олегович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8299-6309>, e-mail: bogdanblashak@gmail.com.

Bohdan Blashchak - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8299-6309>, e-mail: bogdanblashak@gmail.com.

Буравченко Костянтин Олегович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральнотернопільський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6195-7533>, e-mail: buravchenkok@gmail.com.

Kostiantyn Buravchenko - Associate Professor, PhD (candidate of technical sciences), Associate Professor of Cybersecurity & Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6195-7533>, e-mail: buravchenkok@gmail.com.

Віжевський Петро Володимирович - асистент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4851-0839>, e-mail: vizhevskyipv@khmnu.edu.ua.

Petro Vizhevskyi - Teaching Assistant of Computer Engineering and Programming Department, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4851-0839>, e-mail: vizhevskyipv@khmnu.edu.ua.

Войтов Віктор Анатолійович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри транспортних технологій і логістики, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5383-7566>, e-mail: vavoitovva@gmail.com.

Viktor Voito - Professor, Doctor of Technical Sciences, Department head of Transport Technologies and Logistics, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5383-7566>, e-mail: vavoitovva@gmail.com.

Волков Володимир Петрович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедрою технічної експлуатації та сервісу автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-3441>, e-mail: volf-949@ukr.net.

Volodymyr Volkov - Professor, Doctor of Technical Science(s), head of Department of Technical Exploitation and Service of Cars, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-3441>, e-mail: volf-949@ukr.net.

Волкова Тетяна Вікторівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-4119>, e-mail: volf-949@ukr.net.

Tetiana Volkova - Associate Professor, PhD, Candidate of technical science, Associate Professor Department of Transport Technology, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-4119>, e-mail: volf-949@ukr.net.

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 Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Гевко Ігор Богданович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Бережанський фаховий коледж НУБіП, м. Бережани, Тернопільська область, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1984-6822>, e-mail: gevkoigor1@gmail.com.

Ihor Nevko - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Road Transport, Berezhany Professional College of the National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Berezhany, Ternopil Region, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1984-6822>, e-mail: gevkoigor1@gmail.com.

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 131 «Applied mechanics», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0815-4031>, e-mail: elektromagnetichydrogenerator@gmail.com.

Голуб Дмитро Вадимович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4984-1161>, e-mail: dimchik529@gmail.com.

Dmytro Holub - Associate Professor, PhD of Transport Technologies (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4984-1161>, e-mail: dimchik529@gmail.com.

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 in Technics (Candidate of Technics 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.

Гудь Віктор Зіновійович - доцент, доктор технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5312-526X>, e-mail: vic_g@ukr.net.

Viktor Gud - Associate Professor, Doctor of Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5312-526X>, e-mail: vic_g@ukr.net.

Добринчук Олександр Анатолійович - молодший науковий співробітник, Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2877-844X>, e-mail: Dobrynychuk85@icloud.com.

Oleksandr Dobrynychuk - Junior Researcher, State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2877-844X>, e-mail: Dobrynychuk85@icloud.com.

Довбуш Тарас Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8354-7276>, e-mail: tarasdowbush@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: tarasdowbush@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 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 ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Andrii Diachun - Associate Professor, PhD, Department of Engineering of machine-building technologies, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Зайцев Андрій Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6762-098X>, e-mail: medogonki@ukr.net.

Andrii Zaitsev - PhD Student in Industrial Mechanical Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6762-098X>, e-mail: medogonki@ukr.net.

Іл'юк Олексій Дмитрович - старший системний та бізнесовий аналітик, ТОВ «ТЕМАБІТ», м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0904-3045>, e-mail: olexiyilyukm@gmail.com.

Iliuk Oleksii - Senior System & Business Analyst, Team Lead, Temabit LLC, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0904-3045>, e-mail: olexiyilyukm@gmail.com.

Каланча Артем Дмитрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-професійному) рівні, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1451-7470>, e-mail: kalancha.artem@chnu.edu.ua.

Artem Kalancha - PhD Student, Department of Computer System Software, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Cernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1451-7470>, e-mail: kalancha.artem@chnu.edu.ua.

Кирилах Світлана Вікторівна, здобувачка вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Матеріалознавство», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>, e-mail: lanakirilaha@gmail.com.
Svitlana Kyrylakha, PhD student in Materials Science, Chemistry and Technologies, National University "Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>, e-mail: lanakirilaha@gmail.com.

Кириченко Андрій Миколайович - професор, доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральнотехнічний 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 Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4335-9588>, e-mail: kyrychenkoam@kntu.kr.ua.

Кічура Руслан Петрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: romnik83@ukr.net.

Ruslan Kichura - PhD student in Road Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: romnik83@ukr.net.

Коваленко Анастасія Сергіївна - асистентка кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральнотехнічний національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9042-8358>, e-mail: stasja.artem09@gmail.com.

Anastasiia Kovalenko - Assistant Lecturer of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9042-8358>, e-mail: stasja.artem09@gmail.com.

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 - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральнотехнічний національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1729-2033>, e-mail: yukovalyov@ukr.net.

Yurii Kovalov - Associate Professor, PhD (Candidate of Technics 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.

Ковцур Катерина Григорівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0445-5438>, e-mail: kovtsyr@ukr.net.

Kateryna Kovtsur - Associate Professor, PhD in Engineering (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Transportation Systems and Logistics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-0445-5438>, e-mail: kovtsyr@ukr.net.

Козаченко Євген Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4075-439X>, e-mail: Kozachenko.yevhen@gmail.com.

Yevhen Kozachenko - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4075-439X>, e-mail: Kozachenko.yevhen@gmail.com.

Колій Олександр Сергійович - кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5576-3932>, e-mail: koliioleksandr@gmail.com.

Oleksandr Kolii - PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5576-3932>, e-mail: koliioleksandr@gmail.com.

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 (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7965-4784>, e-mail: rkomar@ukr.net.

Красота Михайло Віталійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-3264>, e-mail: krasotamv@ukr.net.

Mykhailo Krasota - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-8791-3264>, e-mail: krasotamv@ukr.net.

Кузик Олександр Володимирович - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-3760>, e-mail: kuzykov1985@gmail.com.

Oleksandr Kuzyk - Assoc. Prof., PhD (Candidate of Technics 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: kuzykov1985@gmail.com.

Кулешков Юрій Володимирович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6492-6919>, e-mail: kul090455@gmail.com.

Yuriy Kuleshkov - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6492-6919>, e-mail: kul090455@gmail.com.

Леськів Павло Олегович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7564-1785>, e-mail: far.better2@gmail.com.

Palvo Leskiv - PhD Student, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7564-1785>, e-mail: far.better2@gmail.com.

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 ERM, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Литвин Василь Володимирович - доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет "Львівська Політехніка", м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9676-0180>, e-mail: vasyl.v.lytvyn@lpnu.ua.

Vasyl Lytvyn - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9676-0180>, e-mail: vasyl.v.lytvyn@lpnu.ua.

Литвинов Ілля Вікторович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7961-8086>, e-mail: illalitvinov901@gmail.com.

Iliia Lytvynov - PhD student in Industrial mechanical engineering, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7961-8086>, e-mail: illalitvinov901@gmail.com.

Лівіцький Олександр Миколайович - кандидат технічних наук, асистент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-4463>, e-mail: Livitskyi885@gmail.com.

Oleksandr Livitskyi - PhD (Candidate of Technical Sciences), Assistant Lecturer at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-4463>, e-mail: Livitskyi885@gmail.com.

Лук'яненко Олександр Геннадійович - старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6642-2300>, e-mail: alukanenko246@gmail.com.

Oleksandr Luk'yanenko - Senior Researcher, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Researcher at the Department of Materials Fundamentals of Surface Engineering, GV Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6642-2300>, e-mail: alukanenko246@gmail.com.

Любий Євген Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>, e-mail: lion_khadi@ukr.net.

Yevhen Liubyi - Associate Professor, PhD in Engineering, Head of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>, e-mail: lion_khadi@ukr.net.

Ляшук Олег Леонтійович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Oleg Lyashuk - Professor, Doctor of Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Манько Єгор Валерійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2413>, e-mail: evm0996496486@gmail.com.

Yehor Manko - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2413>, e-mail: evm0996496486@gmail.com.

Маркович Сергій Іванович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2360>, e-mail: marko60@ukr.net.

Sergii Markovych - 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/0000-0003-1393-2360>, e-mail: marko60@ukr.net.

Моспан Валерій Миколайович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри транспортних систем та технічного сервісу, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Valerii Mospan - PhD (Engineering Sciences), senior lecturer, department of transport systems and technical service, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Мусієнко Ольга Станіславівна - доктор філософії, старший викладач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8255-3909>, e-mail: olga.musinko@gmail.com.

Olha Musiienko - PhD in Applied Mechanics, Senior Lecturer at the Department of Dynamics and Strength of Machines and Strength of Materials, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8255-3909>, e-mail: olga.musinko@gmail.com.

Новицький Юрій Андрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-1115-1747>, e-mail: Novickii_yurka@ukr.net.

Yuri Novitskyi - PhD Student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-1115-1747>, e-mail: Novickii_yurka@ukr.net.

Оленчук Ілля Ігорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7808-4633>, e-mail: ilyaolenchuk@gmail.com.

Iliia Olenchuk - PhD student in Automobile Transport, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7808-4633>, e-mail: ilyaolenchuk@gmail.com.

Олійніченко Любов Сергіївна - доцентка, кандидатка технічних наук, доцентка кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9351-6265>, e-mail: loga_lubov@ukr.net.

Lubov Oliinichenko - Associate Professor, PhD, Associate Professor of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9351-6265>, e-mail: loga_lubov@ukr.net.

Оришечко Дмитро Андрійович - здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Центральноукраїнський державний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5371-8697>, e-mail: 12026083@cuspu.edu.ua.

Dmytro Oryshechko - Master's degree Student in Computer Science, Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5371-8697>, e-mail: 12026083@cuspu.edu.ua.

Осін Руслан Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-5363>, e-mail: ruslan_osin@ukr.net.

Ruslan Osin - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-8927-5363>, e-mail: ruslan_osin@ukr.net.

Остапчук Юлія Олександрівна - здобувачка вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>, e-mail: juli.biluk97@gmail.com.

Ostapchuk Yuliia - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>, e-mail: juli.biluk97@gmail.com.

П'єнтак Марія Дмитрівна - старший викладач кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6758-6593>, e-mail: mariaradyk03@ukr.net.

Mariia Pientak - Senior Lecturer of the Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6758-6593>, e-mail: mariaradyk03@ukr.net.

Паньків Сергій Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: sergo_pan@ukr.net.

Sergii Pankiv - PhD Student in Industrial mechanical engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, e-mail: sergo_pan@ukr.net.

Папінко Андрій Іванович - кандидат економічних наук, викладач кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8515-9376>, e-mail: a.papinko@wunu.edu.ua.

Andrii Papinko - PhD (Candidate of Economic Sciences), lecturer of the department of transport and logistics, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8515-9376>, e-mail: a.papinko@wunu.edu.ua.

Пелешок Тарас Мирославович - докторант кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2136-8340>, e-mail: madbull@meta.ua.

Taras Peleshok - doctoral student of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2136-8340>, e-mail: madbull@meta.ua.

Петленко Володимир Павлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4006-3202> e-mail: Tpetlenko@ukr.net.

Volodymyr Petlenko - PhD Student in Automobile Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4006-3202> e-mail: Tpetlenko@ukr.net.

Пилипець Михайло Ількович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4286-9324>, e-mail: pulupecmi@gmail.com.

Mykhailo Pylypets - Professor, Doctor of Science, Professor of the Mechanical Engineering Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4286-9324>, e-mail: pulupecmi@gmail.com.

Пирогов Володимир Васильович - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5843-4552>, e-mail: pirogovvv@ukr.net.

Volodymyr Pirogov - PhD, Associate Professor of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5843-4552>, e-mail: pirogovvv@ukr.net.

Плекан Уляна Михайлівна - кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-6355>, e-mail: Vnv123@ukr.net.

Uliana Plekan - Associate Professor, PhD, Associate Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-6355>, e-mail: Vnv123@ukr.net.

Погрелюк Ірина Миколаївна - професор, доктор технічних наук, завідувач відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3009-2829>, e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com.

Pohrelyuk Iryna - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Fundamentals of Surface Engineering, GV Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3009-2829>, e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com.

Подригало Михайло Абович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>, e-mail: pmikhab@gmail.com.

Mykhailo Podryhalo - Professor, Doctor of Science, head of Technology of Machinery Manufacturing and Machine Maintenance Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>, e-mail: pmikhab@gmail.com.

Полотай Орест Іванович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління інформаційною безпекою, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4593-8601>, e-mail: orest.polotaj@gmail.com.

Orest Polotai - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Information Security Management, Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4593-8601>, e-mail: orest.polotaj@gmail.com.

Попович Олександр Іванович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Oleksandr Popovych - PhD Student in Road transport, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, e-mail: kaf_tl@wunu.edu.ua.

Присяжнюк Олена Віталіївна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та цифрових технологій, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7135-3124>, e-mail: elena_drobot@ukr.net.

Olena Prysiazhniuk - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Information and Digital Technologies Department, Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7135-3124>, e-mail: elena_drobot@ukr.net.

Пузікова Анна Валентинівна - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних та цифрових технологій, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6843-5583>, e-mail: a.v.puzikova@cuspu.edu.ua.

Anna Puzikova - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor of Information and Digital Technologies Department, Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6843-5583>, e-mail: a.v.puzikova@cuspu.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 Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8536-4599>, e-mail: rogatynskyi@gmail.com.

Руденко Тимофій Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-7624>, e-mail: r-t-v@mail.ua.

Tymofii Rudenko - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-7624>, e-mail: r-t-v@mail.ua.

Рутковський Анатолій Віталійович - старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9515-814X>, e-mail: rut2000@ukr.net.

Rutkovskiy Anatolii - Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Strength of Materials and Structure Department in thermo - Power Fields and Gas Streams, Institute of Strength Problems GS Pisarenko National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9515-814X>, e-mail: rut2000@ukr.net.

Савенко Олег Станіславович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>, e-mail: savenko_oleg_st@ukr.net.

Oleh Savenko - Professor, Doctor in Information Technology (Doctor of Technical Sciences), Professor of Computer Engineering and Programming Department, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>, e-mail: savenko_oleg_st@ukr.net.

Сахно Сергій Анатолійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7874-3376>, e-mail: sahno.avcentr@gmail.com.

Sakhno Serhii - Post-Graduate Student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7874-3376>, e-mail: sahno.avcentr@gmail.com.

Сергійчук Андрій Андрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3588-0560>, e-mail: kirovogradsto@gmail.com.

Andrii Serhiichuk - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3588-0560>, e-mail: kirovogradsto@gmail.com.

Слонь Віктор Вікторович - кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, архітектури та дизайну, Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5535-0794>, e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com.

Viktor Slon - PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of the Department of Construction, Architecture and Design, Kherson State Agrarian and Economic University, Kropyvnytskyi, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5535-0794>, e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com.

Смірнов Олексій Анатолійович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9543-874X>, e-mail: dr.smirnovoa@gmail.com.
Oleksii Smirnov - Professor, Doctor of technical sciences, head of Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9543-874X>, e-mail: dr.smirnovoa@gmail.com.

Смірнов Сергій Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7649-7442>, e-mail: smirnov.ser.81@gmail.com.
Serhii Smirnov - Associate Professor, PhD, Associate Professor of Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7649-7442>, e-mail: smirnov.ser.81@gmail.com.

Смірнова Тетяна Віталіївна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-0612>, e-mail: sm.tetyana@gmail.com.

Tetiana Smirnova - Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer, Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-0612>, e-mail: sm.tetyana@gmail.com.

Сокальська Юлія Олександрівна - здобувачка вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4043-6251>, e-mail: julija_8383@ukr.net.

Sokalska Yuliia - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4043-6251>, e-mail: julija_8383@ukr.net.

Студент Михайло Михайлович - професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5992-5898>, e-mail: student.phmi@gmail.com.

Mykhailo Student - Professor, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of Materials Foundations of Surface Engineering, GV Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5992-5898>, e-mail: student.phmi@gmail.com.

Таран Ігор Олександрович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3679-2519>, e-mail: taran7077@gmail.com.

Ihor Taran - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3679-2519>, e-mail: taran7077@gmail.com.

Тищенко Сергій Юрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8193-3641>, e-mail: tc.eso.ua@gmail.com.

Serhii Tyshchenko - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8193-3641>, e-mail: tc.eso.ua@gmail.com.

Ткаченко Ігор Григорович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3029-4578>, e-mail: tkachenkoigor61@gmail.com.

Ihor Tkachenko - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3029-4578>, e-mail: tkachenkoigor61@gmail.com.

Трапезон Олександр Георгійович - провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка Національної академії наук України, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-9854>, e-mail: coating@ipp.kiev.ua.

Oleksandr Trapezon - Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Strength of Materials and Structure Department in Thermo - Power Fields and Gas Streams, Institute of Strength Problems GS Pisarenko National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-9854>, e-mail: coating@ipp.kiev.ua.

Труш Василь Степанович - старший дослідник, доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2264-3918>, e-mail: trushvasyl@gmail.com.

Trush Vasyl - Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Materials Fundamentals of Surface Engineering, GV Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2264-3918>, email: trushvasyl@gmail.com.

Угрин Дмитро Ілліч - професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4858-4511>, e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua.

Dmytro Ugryn - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Science, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4858-4511>, e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua.

Ужва Анатолій Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів імені А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-8019>, e-mail: uzhva_av@ukr.net.

Anatolii Uzhva - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Automobiles Department by A. B. Hredeskul, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-8019>, e-mail: uzhva_av@ukr.net.

Ушенко Юрій Олександрович - професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри Комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1767-1882>, e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua.

Ushenko Yuriy - Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Computer Science, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1767-1882>, e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua.

Філімоніхін Геннадій Борисович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://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: <https://orcid.org/0000-0002-2819-0569>, e-mail: filimonikhin@ukr.net.

Харченко Сергій Володимирович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-професійному) рівні, Центральнуукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1835-5085>, e-mail: s.kharchenko.ua@gmail.com.

Serhii Kharchenko - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1835-5085>, e-mail: s.kharchenko.ua@gmail.com.

Хорошун Роман Васильович - доктор філософії, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1862-7640>, e-mail: roman_086@ukr.net.

Roman Khoroshun - PhD, Associate Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1862-7640>, e-mail: roman_086@ukr.net.

Цинь Сяосюань - здобувачка вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Транспортні технології (за видами)», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>, e-mail: xiaoxuan@ukr.net.

Xiaoxuan Qin - PhD Student in Transport Technologies by type, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>, e-mail: xiaoxuan@ukr.net.

Цюнь Олег Петрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-4697>, e-mail: tsonoleg@gmail.com.

Oleg Tson – Associate Professor, PhD (Candidate in Technical Sciences), Associate Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-4697>, e-mail: tsonoleg@gmail.com.

Чумак Віталій Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральнуукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com.

Vitalii Chumak - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com.

Шейн Віталій Сергійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9282-0190>, e-mail: sheinvskhadi@gmail.com.

Vitalii Shein - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Technology of Machinery Manufacturing and Machine Maintenance Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9282-0190>, e-mail: sheinvskhadi@gmail.com.

Шепеленко Ігор Віталійович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральнуукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1251-1687>, e-mail: kntucpfzk@gmail.com.

Ihor Shepelenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1251-1687>, e-mail: kntucpfzk@gmail.com.

Шкідіна Катерина Сергіївна - здобувачка вищої освіти на другому (магістерському) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8536-8095>, e-mail: shkidina.kateryna@chnu.edu.ua.

Kateryna Shkidina - Master's degree Student in Computer Science, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8536-8095>, e-mail: shkidina.kateryna@chnu.edu.ua.

Шмельов Віталій Миколайович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2567-9980>, e-mail: shmelyovvm@gmail.com.

Vitalii Shmelov - Associate Professor, PhD, Associate Professor of the department of mechanical engineering, mechatronics and robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2567-9980>, e-mail: shmelyovvm@gmail.com.

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 Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-7686>, e-mail: kir2912s@ukr.net.

Ювженко Олександр Володимирович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: 40101001@gmail.com.

Oleksandr Yuvzenko - PhD Student in Road Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: 40101001@gmail.com.

Якименко Наталія Миколаївна - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4498-0093>, e-mail: yakimenko_n_m@ukr.net.

Nataliia Yakymenko - Associate Professor, PhD (Candidate of Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor of Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4498-0093>, e-mail: yakimenko_n_m@ukr.net.

Янюк Дмитро Володимирович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-професійному) рівні, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9633-0620>, e-mail: yanyuk_10719366@lutsk-ntu.com.ua.

Dmytro Yaniuk - PhD Student in Applied Mechanics and Mechatronics, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9633-0620>, e-mail: yanyuk_10719366@lutsk-ntu.com.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 кожен 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: zbiryk_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 II

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 04.12.2025р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 44,5
Тираж 300 прим. Зам. № 0879