

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 10(41)  
Частина I**

Кропивницький • 2024

---

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 10(41)  
Part I**

Kropyvnytskyi • 2024

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-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 28 жовтня 2024 року № 2.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Лисенко С.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Доренський О.П., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Niger); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, проф.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Коренькова Т.В., д-р техн. наук, доц.; Кузик О.В., канд. техн. наук, доц.; Матейчик В.П., д-р техн. наук, проф.; Мацуї А.М., канд. техн. наук, доц.; Мелешко С.В., д-р техн. наук, проф.; Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А., д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук; Плешков П.Г., канд. техн. наук, проф.; Россолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук, доц.; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Тарандушка Л.А., д-р техн. наук, проф.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, порф.; Яцун В.В., канд. техн. наук, доц.

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 медіа: **R30-03350** (рішення Національної ради України від 25.04.2024 р. № 1418).

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

DOI: 10.32515/2664-262X

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.3-16](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.3-16)**О.С. Улічев**, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***Л.М. Папіж**, асп.*ПВНЗ "Європейський університет", м. Київ, Україна***О.А. Ревнюк**, асп.*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: askin79@gmail.com, l.m.papizh@gmail.com, revo0708@gmail.com*

## Досягнення в тестуванні програмного забезпечення. Наукова перспектива

Тестування програмного забезпечення відіграє ключову роль у визначенні надійності, функціональності та безпеки систем. Стаття досліджує різні аспекти процесу, акцентуючи увагу на наукових принципах, що підвищують результативність процесу. Аналізуються сучасні методології, інструменти та техніки, висвітлюються останні досягнення. Досліджується вплив наукових принципів на тестування та процеси забезпечення якості, практичні наслідки досліджень через аналіз прикладів, їхня ефективність у покращенні якості та зниженні витрат. Мета статті - сприяти розумінню наукових засад тестування програм та його важливій ролі у розвитку майбутніх практик інженерії програмного забезпечення.

**тестування програмного забезпечення, тестування зсув ліворуч, неперервне тестування, штучний інтелект та машинне навчання, автоматизація тестування, тестування зсув праворуч, управління тестовими даними**

**Постановка проблеми.** У цій статті досліджуються різні аспекти інновацій у тестуванні ПЗ, включаючи новітні тенденції, виклики та стратегії для виходу вперед, у постійно змінній галузі розробки програмного забезпечення. Серед ключових моментів варто виділити:

- Важливість прийняття інноваційних практик тестування, таких як тестування "зсув ліворуч", НТ та тестування, що використовує ШІ, для підвищення точності, ефективності та надійності тестів.
- Загальні виклики в реалізації інноваційних практик тестування, такі як опір змінам, застарілі системи, недоліки у навичках та проблеми з конфіденційністю даних.
- Нові тенденції та технології, що формують майбутнє тестування ПЗ, включаючи ШІ та МН, НТ, тестування великих даних, тестування Інтернету речей та автоматизацію роботизованих процесів.
- Стратегії подолання викликів та випередження конкурентів, такі як постійне навчання, співпраця, пілотні проекти, гнучкі методології та орієнтація на клієнта.

У сучасному швидкозмінному та динамічному цифровому середовищі забезпечення якості програмного забезпечення (ПЗ) стає все більш критичним завданням. Традиційні методи тестування часто не встигають за темпами розвитку технологій та вимогами ринку, що призводить до затримок у випуску продуктів, підвищення витрат та зниження якості ПЗ. Основна проблема полягає в необхідності впровадження інноваційних практик тестування, які можуть забезпечити високу точність, ефективність та надійність тестів.

Ця проблема має важливе наукове та практичне значення. З наукової точки зору, дослідження нових методів та технологій тестування, таких як штучний інтелект (ШІ), машинне навчання (МН), тестування великих даних та Інтернету речей (IoT), відкриває нові горизонти для підвищення якості ПЗ. Практичне значення полягає у здатності організацій швидко адаптуватися до змін, знижувати витрати на розробку та тестування, а також забезпечувати високу якість продуктів, що відповідають потребам та очікуванням користувачів.

Впровадження інноваційних практик тестування також стикається з низкою викликів, таких як опір змінам з боку зацікавлених сторін, застарілі системи, недоліки у навичках та проблеми з конфіденційністю даних. Подолання цих викликів вимагає ефективної комунікації, освіти, інвестицій у нові інструменти та технології, а також постійного вдосконалення процесів тестування.

Таким чином, дослідження та впровадження інноваційних практик тестування є ключовим завданням для забезпечення конкурентоспроможності та успіху організацій у сучасному цифровому світі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті розглядаються сучасні проблеми та інноваційні підходи до тестування програмного забезпечення (ПЗ), спираючись на численні дослідження та публікації. Основні аспекти, які висвітлюються в статті, включають тестування зі зсувом ліворуч, неперервне тестування, автоматизацію тестування, використання штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН), а також тестування зі зсувом праворуч.

Тестування зі зсувом ліворуч у дослідженні Дональда Файрсмита [1] та Пета Фелана і Рене Веллса [2] підкреслюють важливість раннього тестування, що дозволяє виявляти дефекти на початкових етапах розробки ПЗ. Ці роботи акцентують увагу на економічних перевагах та підвищенні якості продукту завдяки ранньому виявленню дефектів. Максиміліано А. Маскероні та Емануель Ірразабаль [3] у своєму систематичному огляді літератури досліджують рішення для проблем тестування в умовах неперервної доставки. Вони підкреслюють важливість автоматизації тестування та інтеграції тестових процесів на кожному етапі розробки ПЗ. Алтай Атаман [4] також розглядає переваги та виклики неперервного тестування, акцентуючи на його ролі у забезпеченні якості та надійності ПЗ. Енріке Де Косс [10] та Леонардо Маріані з колегами [11] досліджують еволюцію автоматизації тестування та її центральну роль у забезпеченні якості ПЗ. Вони підкреслюють важливість використання сучасних інструментів та фреймворків для автоматизації тестування, таких як Selenium, Appium та Cypress. Ніко Крюгер [6] та Gradient Ascent [7] досліджують роль Штучного Інтелекту та Машинного Навчання у тестуванні ПЗ, підкреслюючи їх здатність покращувати процеси тестування та знижувати кількість помилок. Вони наводять приклади успішного використання ШІ та МН для автоматизації тестування та аналізу логів. Піюша Подутвар [13] та Парваті Пурушотаман [15] розглядають переваги тестування зі зсувом праворуч, яке акцентується на тестуванні після випуску ПЗ. Вони підкреслюють важливість отримання зворотного зв'язку від користувачів та виявлення проблем у реальних умовах використання.

Незважаючи на значний прогрес у дослідженнях та впровадженні інноваційних практик тестування, залишаються невирішені частини загальної проблеми, які потребують подальшого вивчення. Серед них: інтеграція нових технологій, таких як ШІ та МН, у існуючі процеси тестування. Подолання опору змінам з боку зацікавлених сторін та адаптація до нових методологій. Забезпечення конфіденційності та цілісності даних під час тестування. Розвиток навичок та знань у сфері інноваційних методів тестування серед фахівців. Ця стаття присвячена дослідженню та вирішенню цих

невирішених питань, пропонуючи нові підходи та стратегії для покращення якості та ефективності тестування ПЗ.

**Виклад основного матеріалу.** Тестування ПЗ охоплює діяльності для оцінки якості та продуктивності програмних продуктів. Це включає тестові випробування, сценарії та скрипти для виявлення дефектів, перевірки функціональності та відповідності специфікаціям. Ретельне тестування дозволяє виявити та вирішити проблеми на ранніх етапах, зменшуючи ймовірність помилок у виробничих середовищах. Значення тестування ПЗ виходить за межі виявлення дефектів; це фундаментальний аспект забезпечення якості, включаючи зручність використання, безпеку та продуктивність. Практики тестування допомагають забезпечити відповідність ПЗ функціональним і нефункціональним вимогам. У сучасному ринковому середовищі, де користувацький досвід вирішальний, роль тестування ПЗ у створенні якісного ПЗ не можна недооцінювати.

Тестування зі зсувом ліворуч. Останнім часом відбулася зміна парадигми в практиках тестування ПЗ на користь підходу "зсув ліворуч". Цей метод передбачає переміщення тестувальних дій на ранні етапи життєвого циклу розробки ПЗ, зазвичай на початкові етапи процесу розробки[1]. Підхід підкреслює важливість раннього тестування, такого як модульне тестування, статичний аналіз коду та рецензії коду, на відміну від відкладання тестування до пізніших етапів.

Тестування "зсув ліворуч" ґрунтується на принципі "тестування на ранніх етапах, тестування часто". Переміщення тестувальних дій на початок життєвого циклу розробки дозволяє організаціям виявляти та виправляти дефекти та вразливості меншими коштами та швидше. Основні принципи включають: раннє виявлення дефектів, що знижує ризик їх потрапляння в експлуатаційні середовища продукції. Тестування за типом "зсув ліворуч" забезпечує постійний зворотний зв'язок між командами розробки та тестування, дозволяючи швидші ітерації та вирішення проблем. Розробники отримують негайний зворотний зв'язок, що дозволяє їм вносити корективи в реальному часі. Це сприяє співпраці та комунікації між розробниками, тестувальниками та іншими зацікавленими сторонами протягом всього процесу розробки. Раннє залучення тестувальних команд забезпечує пріоритетність якості з самого початку. Автоматизація дозволяє швидко виконувати тести та аналіз коду, покращуючи ефективність та надійність результатів.

Раннє виявлення та запобігання дефектам є основою стратегії "зсув ліворуч" і приносить значні переваги організаціям. Виявлення та виправлення дефектів на ранніх етапах значно знижує витрати. Дослідження показують [2], що витрати на виправлення дефектів зростають експоненційно через життєвий цикл розробки ПЗ, тому раннє виявлення більш вигідне з економічної точки зору. Це прискорює цикл розробки та скорочує час до введення продукту на ринок, дозволяючи швидше реагувати на ринкові вимоги. Раннє виявлення дефектів підвищує якість та надійність продукту, що забезпечує позитивний досвід користувача, збільшує задоволеність та лояльність клієнтів. Організації, активно усуваючи дефекти, здобувають довіру клієнтів і підсилюють свою репутацію на ринку.

Комерційні організації ефективно застосовують методології тестування "зсув ліворуч" та отримують значні покращення якості ПЗ, ефективність та задоволення клієнтів[2]. Сценарії компаній демонструють ефективність тестування "зсув ліворуч" у різних галузях. Організації відзначили зниження дефектності через виявлення та виправлення проблем на ранніх етапах розробки. Це дозволило прискорити випуски продуктів та швидше виводити їх на ринок, отримуючи конкурентну перевагу. Раннє залучення тестувальних команд покращило співпрацю між розробниками і тестувальниками, сприяючи кращому розумінню цілей щодо якості. Організації

повідомляли про покращення якості продукту, надійності та задоволення користувачів через раннє виявлення та попередження дефектів. Ці приклади підтверджують важливість та актуальність тестування "зсув ліворуч" у сучасних практиках розробки ПЗ.

Неперервне тестування (НТ) є ключовим аспектом сучасних практик розробки ПЗ, що забезпечує якість та надійність програмних продуктів протягом усього життєвого циклу ПЗ [3]. Воно включає автоматизацію тестування та інтеграцію на кожному етапі, від початкової розробки до впровадження та підтримки.

НТ ґрунтується на принципі вчасного, частого і паралельного тестування з розробкою [4]. Воно включає модульне, інтеграційне, функціональне, продуктивності та безпеки тестування. Автоматизація тестування і включення його в процес неперервної інтеграції/неперервного впровадження (НІ/НВ) дозволяє виявляти дефекти на ранніх етапах, забезпечуючи швидкий зворотний зв'язок. НТ інтегроване з іншими DevOps практиками, такими як НІ та НВ, і підкреслює співпрацю між командами, забезпечуючи швидші ітерації, коротші цикли випуску та вищу якість ПЗ.

Інструменти, фреймворки та методології для впровадження НТ. Для впровадження практик неперервного тестування доступні численні інструменти, фреймворки та методології [5].

Таблиця 1 - Інструменти автоматизації процесів тестування

| Категорія інструментів/практик тестування | Опис та призначення інструментів/практик                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фреймворки автоматизації тестування       | Інструменти, такі як Selenium, Appium та Cypress, часто використовуються для автоматизації функціонального тестування WEB та мобільних додатків. Ці фреймворки дозволяють тестувальникам писати автоматизовані тестові скрипти, які можна виконувати повторно та з очікуваними надійними результатами на різних середовищах та платформах. |
| Інструменти для тестування продуктивності | Інструменти, такі як JMeter, Load Runner та Gatling, використовуються для тестування продуктивності, що дозволяє організаціям оцінити масштабованість, реактивність та стабільність їх додатків за різних навантажень.                                                                                                                     |
| Інструменти для тестування API            | Інструменти, такі як Postman, Soap UI та REST Assured, сприяють автоматизованому тестуванню API, дозволяючи організаціям перевіряти функціональність, надійність та безпеку своїх API точок доступу.                                                                                                                                       |
| Контейнеризація та оркестрація            | Технології, такі як Docker та Kubernetes, дозволяють організаціям створювати та керувати ізольованими тестовими середовищами за допомогою контейнерів. Контейнеризація забезпечує більшу гнучкість, масштабованість та послідовність в тестових середовищах, сприяючи швидшому та надійному тестуванню.                                    |
| Практики тестування "зсув ліворуч"        | Постійне тестування часто доповнюється практиками "зсув ліворуч", такими як статичний аналіз коду, рецензування коду та модульне тестування. Ці практики допомагають виявляти дефекти та вразливості на ранніх етапах розробки, зменшуючи ймовірність проблем у експлуатаційних середовищах.                                               |

Джерело: розроблено авторами

Штучний інтелект та машинне навчання це технології, що революціонізують галузь тестування ПЗ, пропонуючи інноваційні рішення для покращення процесів тестування та результатів [6]. У цьому розділі ми досліджуємо застосування ШІ та МН в тестуванні ПЗ, переваги рішень з тестування, що використовують ШІ, а також реальні випадки, що демонструють їх ефективність.

Технології ШІ та МН мають широкий спектр застосувань в тестуванні ПЗ. Алгоритми можуть автоматично генерувати тестові сценарії на основі вимог, аналізу коду та історичних даних [7], прискорюючи процес та забезпечуючи комплексне покриття. Моделі ШІ можуть аналізувати зміни в коді, результати тестування та інші дані для прогнозування дефектів. Це дозволяє пріоритезувати зусилля на високоризикові області. Алгоритми ШІ пріоритезують та планують тести, оптимізуючи ресурси та скорочуючи час виходу на ринок. Техніки ШІ можуть виявляти аномалії та відхилення, дозволяючи виявляти дефекти на ранніх стадіях. Вони аналізують журнали та системні дані, виявляючи шаблони, тенденції та аномалії, що вказують на проблеми в ПЗ [8].

Переваги ШІ у тестуванні ПЗ та оптимізації коду включають наступні аспекти: ефективність (автоматизація генерації тестів, прогнозування дефектів і оптимізація виконання тестів зменшують повторювані завдання, підвищуючи ефективність і продуктивність); точність (алгоритми ШІ аналізують великі обсяги даних і виявляють шаблони, пропущені людьми, покращуючи точність тестування); масштабованість (ШІ рішення масштабуються для складних систем і великих проєктів, дозволяючи комплексне тестування); зниження витрат (автоматизація тестування і оптимізація ресурсів знижують витрати та скорочують час виходу на ринок, надаючи конкурентну перевагу); покращення якості (ШІ рішення виявляють дефекти на ранніх етапах, підвищуючи якість ПЗ і задоволення клієнтів).

Наведені переваги підкреслюють ефективність технологій ШІ та МН у вдосконаленні процесів тестування та результатів, демонструючи їх потенціал для революціонізації галузі тестування ПЗ. Приймаючи рішення щодо використання тестування, заснованого на ШІ, організації можуть досягти швидших, надійніших і вищої якості випусків ПЗ, що в кінцевому підсумку приносить їхнім клієнтам задоволення якістю [9].

Автоматизація тестування є невід'ємною частиною сучасних практик, покращуючи ефективність, точність і надійність процесів тестування. У цій частині досліджується еволюція автоматизації, її роль у підвищенні ефективності тестування ПЗ, найкращі практики для впровадження автоматизованих тестових наборів, а також виклики та аспекти реалізації [10].

Автоматизація тестування значно еволюціонувала від ручних методів до складних фреймворків та інструментів. Спочатку вона зосереджувалася на автоматизації повторюваних і часоємних ручних завдань, таких як регресійне та оглядове тестування. З розвитком технологій та практик Agile і DevOps автоматизація охопила різні типи тестування, включаючи функціональне, тестування продуктивності та API. Роль автоматизації тестування у вдосконаленні ефективності тестування ПЗ має багатогранний характер [11]:

- Швидкість та точність: автоматизовані скрипти виконують тести швидше та точніше за ручне тестування, що прискорює цикл зворотного зв'язку та зменшує час виходу на ринок.
- Повторюваність та послідовність: автоматизовані тести зменшують ризик людських помилок та забезпечують послідовність результатів.
- Збільшення покриття тестування: автоматизація дозволяє виконувати більше тестів за менший час, підвищуючи впевненість у якості ПЗ.

- Регресійне тестування: автоматизація регресійного тестування швидко виявляє та усуває дефекти від змін у коді, зберігаючи функціональність під час розробки.

Загалом, автоматизація тестування важлива для оптимізації процесів, зменшення ручної праці та підвищення ефективності тестування в проектах розробки ПЗ. Успішне впровадження та підтримка автоматизованих тестових наборів вимагають дотримання найкращих практик[12]:

- Проектування та планування тестів: розробка стратегії тестування та пріоритезація сценаріїв на основі ризику та впливу на бізнес.
- Вибір і проектування інструментів та фреймворків: вибір відповідних інструментів для автоматизації тестування на основі вимог проекту та експертизи.
- Проектування та виконання тестових сценаріїв: написання чітких тестових скриптів, використовуючи моделі сторінки та тестування на основі даних. Пріоритезація сценаріїв на основі частоти, складності та критичності.
- Постійна інтеграція та постачання: інтеграція автоматизованих тестів у процес НІ/НВ для неперервного тестування та зворотнього зв'язку.
- Моніторинг та підтримка: регулярне оновлення автоматизованих тестових скриптів для врахування змін у ПЗ. Механізми моніторингу та сповіщення для своєчасного виявлення проблем.

Слід враховувати виклики та аспекти при впровадженні та реалізації автоматизації тестування. Незважаючи на багато переваг, впровадження та реалізація автоматизації тестування стикаються з декількома викликами:

- Початкові витрати: інструменти, інфраструктура та навчання можуть бути дорогими, особливо для малих та середніх підприємств.
- Недостатність навичок: автоматизація потребує спеціалізованих навичок, що може бути проблемою для організацій у наборі та збереженні кваліфікованих інженерів.
- Витрати на підтримку: підтримка автоматизованих тестів потребує постійних зусиль для оновлення та адаптації до змін у тестованому ПЗ.
- Обмеження покриття тестування: Автоматизація може не охоплювати всі сценарії, особливо ті, що вимагають людського судження.
- Вибір і сумісність інструментів: Вибір інструментів залежить від вимог проекту та технологічного стеку, важлива сумісність з існуючою інфраструктурою.

Хоча автоматизація тестування надає значні переваги щодо ефективності, точності та надійності, організації повинні ретельно розглянути виклики та аспекти впровадження для максимізації її ефективності та повернення від інвестицій. Дотримуючись найкращих практик та вирішуючи виклики, організації можуть підвищити якість та ефективність своїх проєктів.

Тестування за типом “зсув праворуч”[13] та дослідницьке тестування[14] є інноваційними підходами, спрямованими на дослідження і підтвердження функціональності ПЗ в реальних середовищах. У цьому розділі досліджуються визначення та цілі цих підходів, переваги тестування у виробничих середовищах та стратегії їх включення до процесів забезпечення якості.

Тестування за типом “зсув праворуч” акцентується на тестуванні після випуску ПЗ. Це розширює тестувальні дії на післявипускову фазу, дозволяючи отримувати зворотний зв'язок в реальному часі та підтверджувати функціональність ПЗ в реальних умовах. Основна мета - виявлення та усунення проблем і дефектів, які виникають в середовищах використання.

Дослідницьке тестування акцентується на дослідженні, відкритті та навчанні під час виконання тестових сценаріїв. На відміну від сценарійних підходів, воно

ґрунтується на інтуїції, креативності та знаннях, щоб виявляти дефекти та оцінювати поведінку ПЗ. Мета дослідницького тестування — виявлення несподіваної поведінки, проблем з використанням та граничних випадків, що не включені в заздалегідь визначені сценарії, покращуючи обсяг та ефективність тестування.

Користь в тестуванні в середовищах використання та вивченні функціональності ПЗ

- Перевірка в реальних умовах: тестування дозволяє організаціям перевірити функціональність ПЗ в реальних умовах, надаючи уявлення про роботу ПЗ.

- Виявлення проблем на ранніх стадіях: “зсув праворуч” тестування виявляє та усуває проблеми, які з’являються лише в середовищах використання, як обмеження продуктивності та сумісність.

- Зворотний зв’язок від користувачів: тестування сприяє отриманню зворотного зв’язку від користувачів, що дозволяє організаціям зрозуміти їхню поведінку, вподобання та проблеми, враховуючи це у майбутніх ітераціях ПЗ.

- Постійне вдосконалення: дослідницьке тестування заохочує креативне мислення та виявлення несподіваних проблем, що призводить до покращення якості ПЗ.

Стратегії включення “зсув праворуч” тестування та дослідницького тестування в процеси забезпечення якості передбачають:

- Постійний моніторинг: впровадження механізмів моніторингу та сповіщення для відстеження продуктивності та поведінки ПЗ в реальних умовах. Використання інструментів для виявлення аномалій та проблем.

- А/В-тестування: використання А/В-тестування для порівняння продуктивності різних версій ПЗ. Отримання зворотного зв’язку від користувачів та аналіз метрик для оцінки змін.

- Зворотний зв’язок від користувачів: створення каналів для збору відгуків від користувачів, залучення зворотного зв’язку в процеси забезпечення якості для пріоритизації тестування.

- Міжфункціональна співпраця: співпраця між командами розробки, тестування, операцій та управління продуктом. Впровадження культури навчання та вдосконалення в організації.

Включаючи “зсув праворуч” та дослідницьке тестування в процеси якості, організації покращують валідацію функціональності ПЗ, отримують зворотний зв’язок від користувачів і постійно вдосконалюють якість та зручність ПЗ. Ці інноваційні підходи доповнюють традиційні методи тестування, дозволяючи створювати високоякісне ПЗ, яке відповідає потребам та очікуванням користувачів [15].

Методології DevOps та Agile змінили парадигму розробки ПЗ та тестування, акцентуючи на співпраці, гнучкості та постійному вдосконаленні. У цьому розділі надається огляд методологій DevOps та Agile та їх вплив на тестування ПЗ, розглядається колаборативний підхід до тестування в цих середовищах, а також інструменти та методики для інтеграції забезпечення якості в робочі процеси. Методології DevOps та Agile значно впливають на процеси тестування програмного забезпечення, змінюючи підходи до розробки, інтеграції та доставки продуктів [16]. Agile Методологія – ітеративний підхід до розробки ПЗ, що акцентує співпрацю, гнучкість та зворотний зв’язок від клієнта. Agile методології, такі як Scrum та Kanban, розбивають цикли на невеликі інкременти (спринти або ітерації), дозволяючи командам швидко постачати ПЗ та адаптуватися до змін. Agile тестування фокусується на постійному тестуванні з акцентом на співпраці. DevOps Методологія – культурний та організаційний рух, що акцентує співпрацю, автоматизацію та неперервне впровадження. DevOps руйнує бар’єри між командами розробки та операцій, дозволяючи швидше постачати ПЗ за допомогою автоматизації, НІ та НВ. DevOps тестування інтегрує тестувальні процеси у розробку та впровадження, дозволяючи

командам швидко постачати високоякісне ПЗ. Вплив методологій DevOps та Agile на тестування ПЗ включає акцент на співпрацю та комунікацію між командами. Підходи "зсув ліворуч" та "зсув праворуч" інтегрують тестування на початкових та кінцевих етапах розробки. Автоматизація тестувальних активностей, як-от модульне, інтеграційне та регресійне тестування, підтримує практики НІ та НВ. Методи тестування Agile, як-от розробка на основі тестування, поведінки та дослідницьке тестування, забезпечують всебічне покриття та постачання високоякісного ПЗ.

У середовищах DevOps та Agile тестування є спільним зусиллям розробників, тестувальників, інженерів з операцій та інших зацікавлених сторін. Основні принципи включають крос-функціональні команди для тісної співпраці, культуру спільної відповідальності за якість, постійний зворотний зв'язок через зустрічі та ретроспективи, а також інвестиції в інструменти автоматизації, які підтримують інтеграцію протягом усього життєвого циклу розробки та тестування, дозволяючи автоматизувати повторювані завдання. Деякі інструменти та методики, що підтримують інтеграцію контролю якості у робочі процеси DevOps та Agile, представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – Інструменти контролю якості

*Джерело: розроблено авторами*

Інструменти, такі як Jenkins, Travis та GitLab, автоматизують процеси збирання, тестування та розгортання ПЗ, дозволяючи командам швидко та надійно постачати ПЗ. Використання фреймворків, таких як Selenium, Cypress та JUnit, для автоматизації тестування та підтримки постійного тестування. Платформи співпраці, такі як Jira, Slack та Confluence, сприяють комунікації, координації та обміну знаннями. Інструменти моніторингу та сповіщення, такі як Prometheus, Grafana та NewRelic, відстежують продуктивність, виявляють аномалії та повідомляють про потенційні проблеми. Використання цих інструментів дозволяє інтегрувати контроль якості в процеси DevOps та Agile, забезпечуючи швидку та надійну доставку високоякісного ПЗ, сприяючи культурі співпраці, вдосконалення та інновацій.

Управління тестовими даними є важливим для точності, надійності та ефективності тестування ПЗ. Основні причини включають: ефективне управління даними, що забезпечує всебічне покриття тестами різних функцій програми. Високоякісні тестові дані забезпечують точність результатів, мінімізуючи хибні позитивні та негативні результати, і дозволяють виявляти справжні дефекти. Добре організовані дані прискорюють цикли тестування, зменшують час на підготовку та підтримку. Управління даними забезпечує цілісність та послідовність тестових середовищ, запобігаючи втратам даних та несанкціонованому доступу. Це допомагає організаціям дотримуватися нормативних вимог, таких як GDPR, HIPAA та PCI DSS, шляхом впровадження заходів конфіденційності та безпеки даних.

Техніки генерації, маскування та управління тестовими даними [17] включають синтетичну генерацію даних, де штучні набори даних створюються на основі

попередньо визначених правил, а також екстракцію даних з виробничих середовищ або зовнішніх джерел. Часто застосовуються техніки анонімізації та приховування для захисту конфіденційної інформації під час генерації. Маскування даних передбачає заміну конфіденційної або чутливої інформації в наборах тестових даних фіктивними або перемішаними значеннями зі збереженням структури та цілісності даних. Для ефективного маскування чутливих елементів даних використовуються техніки псевдонімізації, шифрування та токенизації. Підмножини даних передбачають видобуток підмножини важливих даних з виробничих баз даних для створення менших, репрезентативних наборів даних для цілей тестування. Техніки підмножини даних забезпечують копіювання або реплікацію лише необхідних даних в тестові середовища, що зменшує вимоги до сховища та покращує продуктивність. Інструменти профілювання даних аналізують та характеризують набори тестових даних для ідентифікації шаблонів, аномалій та проблем якості даних. Техніки виявлення даних допомагають тестувальникам ефективно знаходити та витягувати відповідні дані з розподілених або гетерогенних джерел даних. Практики керування версіями та життєвим циклом тестових даних відстежують зміни в наборах тестових даних з плином часу, що дозволяє тестувальникам повертатися до попередніх версій, перевіряти зміни в даних та ефективно керувати залежностями даних.

Аспекти, які забезпечують конфіденційність та безпеку даних в тестових середовищах [18] включають: використання маскування та шифрування для захисту чутливої інформації (особисті дані, фінансові дані, інтелектуальна власність) від несанкціонованого доступу. Застосування політики контролю доступу на основі ролей для обмеження доступу до даних залежно від ролей користувачів. Реалізація механізмів аутентифікації та авторизації для доступу до чутливих даних лише авторизованими користувачами. Встановлення політик управління даними для збору, зберігання, використання та видалення тестових даних відповідно до нормативних актів. Регулярні аудити та оцінки для дотримання політик конфіденційності та безпеки. Використання протоколів та алгоритмів шифрування для безпечної передачі даних між середовищами. Реалізація механізмів безпечного передавання файлів (SFTP, HTTPS) для захисту даних під час транспортування. Маскування даних для захисту в невиробничих середовищах (розробка, тестування, підготовка). Шляхом врахування цих аспектів та впровадження передових практик управління тестовими даними, організації можуть забезпечити точність, ефективність та безпеку своїх процесів тестування ПЗ, захищаючи важливу інформацію та відповідаючи вимогам законодавства.

Виклики та майбутні тенденції у впровадженні інноваційних практик тестування часто супроводжується своєрідними труднощами [18]. Опір змінам від зацікавлених сторін і команд може ускладнити прийняття. Подолання опору вимагає ефективної комунікації, освіти та демонстрації цінності через пілотні проекти. Старі системи та застарілі інструменти можуть не легко приймати інновації. Модернізація систем, інвестиції в нові інструменти та поступова відмова від старих процесів допомагають подолати ці виклики. Отримання навичок у нових технологіях, як-от ШІ та автоматизація тестування, може бути викликом. Надання навчання, наставництва та професійного розвитку допомагає заповнити прогалини в навичках. Інтеграція нових інструментів з існуючими середовищами може викликати проблеми. Забезпечення сумісності та інтеграції вимагає планування та співпраці. Управління чутливими даними, забезпечення конфіденційності та відповідність вимогам регуляторів, таких як GDPR та HIPAA, становить виклик. Впровадження маскування, шифрування та контролю доступу є ключовим для захисту інформації.

Нові тенденції та технології, що формують майбутнє тестування ПЗ представлено на рис.2.



Рисунок 2 – Подальші напрямки розвитку тестування

*Джерело: розроблено авторами*

Кілька нових тенденцій та технологій перетворюють простір тестування ПЗ. ШІ та МН революціонізують тестування ПЗ, автоматизуючи генерацію тестових випадків, передбачаючи дефекти та оптимізуючи процеси тестування. Інструменти тестування, які працюють на базі ШІ, можуть аналізувати величезні обсяги тестових даних, виявляти закономірності та надавати корисні висновки тестувальникам.

Практики НТ, такі як тестування на початкових етапах, тестування на післяринкових етапах та НІ/НВ, набирають популярності в Agile та DevOps середовищах. НТ дозволяє командам швидко перевіряти зміни, зменшувати ризики та забезпечувати якість ПЗ протягом усього життєвого циклу розробки.

З поширенням додатків та платформ великих даних тестування продуктивності, масштабованості та надійності систем великих даних стає новими викликами для тестувальників. Інструменти та методики тестування великих даних, такі як валідація даних, тестування продуктивності та розподілене тестування, є ключовими для забезпечення якості рішень в галузі великих даних.

Інтернет речей (IoT) створює унікальні виклики для тестування через складність, різноманітність та взаємопов'язаність пристроїв та екосистем IoT. Тестування IoT зосереджене на підтвердженні взаємодії пристроїв, безпеці, надійності та продуктивності в різних середовищах та випадках використання.

Технології роботизації процесів автоматизують повторювані завдання на основі правил, таких як регресійне тестування, введення даних та тестування графічного інтерфейсу користувача, звільняючи тестувальників від нудних завдань та дозволяючи їм зосередитися на складніших та творчих тестувальних діях. Інструменти технології роботизації можуть оптимізувати робочі процеси тестування, покращувати ефективність та зменшувати ручні зусилля.

Щоб подолати виклики та виходити вперед у галузі тестування ПЗ, організації можуть прийняти інноваційні стратегії подолання викликів та виходу вперед у галузі комп'ютерних наук.

Заохочення культури постійного навчання, експериментів та адаптації. Інвестиції в навчальні програми, сертифікаційні курси та обмін знаннями для підвищення кваліфікації співробітників. Сприяння співпраці між розробниками, тестувальниками, операторами та іншими зацікавленими сторонами. Створення крос-функціональних команд для вирішення проблем та обміну експертизами. Аналіз пілотних проєктів та доказів концепцій для оцінки нових інструментів і технологій. Збирання відгуків, вдосконалення на основі отриманих уроків та масштабування успішних ініціатив. Використання гнучкого підходу до тестування, регулярний збір відгуків та постійне вдосконалення процесів. Розвиток експериментів та інновацій для забезпечення постійного вдосконалення. Першочергово враховувати потреби та

зворотний зв'язок клієнтів, інтегрувати його у процеси тестування для забезпечення відповідності ПЗ потребам користувачів.

Шляхом прийняття новітніх тенденцій, подолання викликів та впровадження ефективних стратегій, організації можуть розмістити себе таким чином, щоб процвітати у все більш динамічному та конкурентному середовищі, надаючи високоякісне ПЗ, яке відповідає зростаючим потребам та очікуванням клієнтів.

**Висновки.** Прийняття інновацій у тестуванні ПЗ є невід'ємною складовою для підвищення якості, ефективності та конкурентоспроможності в сучасному швидкозмінному та динамічному цифровому середовищі. Шляхом прийняття інноваційних практик тестування, організації можуть:

- Підвищення точності та надійності тестів: інноваційні практики тестування дозволяють організаціям виявляти дефекти на ранніх етапах, покращувати покриття тестування та постачати високоякісне ПЗ, що відповідає потребам і очікуванням користувачів.

- Прискорення виходу на ринок: НТ, автоматизація та гнучкі методології оптимізують процеси тестування, прискорюють вихід на ринок та дозволяють організаціям швидко реагувати на змінні вимоги клієнтів та ринкові тенденції.

- Зменшення витрат та ризиків: інноваційні практики тестування допомагають організаціям зменшити витрати на тестування, мінімізувати ризики та зменшити вплив дефектів та відмов на бізнес-операції, задоволеність клієнтів та репутацію бренду.

- Стимулювання постійного вдосконалення та інновацій: прийняття інновацій у тестуванні ПЗ сприяє створенню культури постійного вдосконалення, експериментування та інновацій всередині організацій. За допомогою постійного дослідження нових інструментів, технологій та методологій, організації можуть залишатися на передньому краї індустрії та стимулювати інновації в тестуванні та розробці ПЗ.

У статті досліджено важливість тестування програмного забезпечення в контексті інженерії програмного забезпечення, підкреслюючи ключову роль, яку відіграє тестування у визначенні надійності, функціональності та безпеки програмних систем. Проаналізовано сучасні методології, інструменти та техніки тестування, щоб висвітлити найновіші досягнення в цій області.

Тестування програмного забезпечення включає в себе різні дії, спрямовані на оцінку якості та продуктивності продуктів програмного забезпечення. Це включає систематичне виконання тестових випробувань, сценаріїв та скриптів для виявлення дефектів, перевірки функціональності та підтвердження відповідності специфікаціям.

Мета статті - надати глибоке розуміння змін у галузі тестування програмного забезпечення та їх впливу на якість та надійність програм. Ця мета досягалась шляхом узагальнення результатів академічних досліджень, розгляду тенденцій в галузі та оцінки думок експертів. Стаття має наукову значущість, оскільки вона надає цінний внесок у розуміння сучасних тенденцій та методологій в галузі тестування програмного забезпечення, що може слугувати основою для подальших досліджень та розробок.

Підсумовуючи, прийняття інновацій у тестуванні ПЗ є невід'ємною складовою для організацій, які прагнуть постачати високоякісне ПЗ ефективно та конкурентоспроможного в сучасній цифровій економіці. Шляхом прийняття новітніх тенденцій, подолання викликів та прийняття орієнтованого на клієнта підходу до тестування, організації можуть позиціонувати себе для успіху вусе складнішому та конкурентному ринковому середовищі.

Через постійне навчання, співпрацю та адаптацію, організації можуть використовувати потужність інновацій для підвищення якості, ефективності та інновацій в тестуванні ПЗ, в кінцевому підсумку постачаючи передові продукти та враження, які приносять задоволення клієнтам та забезпечують зростання бізнесу.

## Список літератури

- 1 Donald Firesmith, «Four Types of Shift Left Testing,» Carnegie Mellon University, 15 March 2015. URL: <https://insights.sei.cmu.edu/blog/four-types-of-shift-left-testing/>. (дата звернення: 8 April 2024).
- 2 Pat Phelan та Renee Wells, «Adopting a "Shift Left" Strategy to Transform Technology Support Services,» 2020. URL: <https://www.riministreet.com/wp-content/uploads/2020/07/Rimini-Street-Shift-Left-Strategy-Transforms-Tech-Support-Services-White-Paper.pdf>. (дата звернення: 2 April 2024).
- 3 Maximiliano A. Mascheroni та Emanuel Irrazábal, «Continuous Testing and Solutions for Testing Problems in Continuous Delivery: A Systematic Literature Review,» September 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/340396275\\_Continuous\\_Testing\\_and\\_Solutions\\_for\\_Testing\\_Problems\\_in\\_Continuous\\_Delivery\\_A\\_Systematic\\_Literature\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/340396275_Continuous_Testing_and_Solutions_for_Testing_Problems_in_Continuous_Delivery_A_Systematic_Literature_Review). (дата звернення: 7 April 2024).
- 4 Altay Ataman, «Continuous Testing in 2024: Top 7 Benefits & Challenges,» January 2024. URL: <https://research.aimultiple.com/continuous-testing/>. (дата звернення: 5 April 2024).
- 5 Yogesh Solanki, «Top 21 API Automation Testing Tools that Make Automation Easy,» TestGrid, 11 March 2022. URL: <https://testgrid.io/blog/api-automation-testing-tools/>. (дата звернення: 5 April 2024).
- 6 Nico Krüger, «AI Testing and Machine Learning in Software Testing,» 24 August 2020. URL: <https://www.perforce.com/blog/alm/ai-testing-and-machine-learning-software-testing>. (дата звернення: 9 April 2024).
- 7 Gradient Ascent, «The Role of AI in Software Testing: Streamlining Processes and Reducing Errors,» 23 January 2024. URL: <https://gradient-ascent.com/ai-in-software-testing/>. (Дата звернення: 9 April 2024).
- 8 Qian Cheng, Amrita Saha, Wenzhuo Yang, Chenghao Liu, Doyen Sahoo та Steven Hoi, «LOGAI: A LIBRARY FOR LOG ANALYTICS AND INTELLIGENCE,» 31 January 2023. URL: <https://arxiv.org/pdf/2301.13415.pdf>. (дата звернення: 9 April 2024).
- 9 Abdullah A. Abonamah та Neda Abdelhamid, «Managerial insights for AI/ML implementation: a playbook for successful organizational integration,» 12 March 2024. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44163-023-00100-5>. (дата звернення: 7 April 2024).
- 10 Enrique DeCoss, «The Evolution of Automation Testing,» 5 March 2023. URL: <https://www.accelq.com/blog/testing-evolution/>. (дата звернення: 11 April 2024).
- 11 Leonardo Mariani, Dan Hao, Rajesh Subramanyan та Hong Zhu, «The central role of test automation in software quality assurance,» 10 July 2017. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11219-017-9383-5>. (дата звернення: 11 April 2024).
- 12 Tahanima Chowdhury, «Test Automation Best Practices For Better Testing In 2024,» 28 March 2024. URL: <https://saucelabs.com/resources/blog/test-automation-best-practices-2024>. (дата звернення: 11 April 2024).
- 13 Piyusha Podutwar, «Shift Right Testing: Know its Benefits, Types, and Tools,» 14 November 2023. URL: <https://www.lambdatest.com/learning-hub/shift-right-testing>. (ата звернення: 15 April 2024).
- 14 Ahmad Nauman Ghazi, Kai Petersen, Elizabeth Bjarnason та Per Runeson, «Exploratory Testing: One Size Doesn't Fit All,» URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.00537.pdf>. (дата звернення: 15 April 2024).
- 15 Parvathy Purushothaman, «Beyond Deployment: Unveiling the Dynamics of ShiftRight Testing,» 19 February 2024. URL: <https://ijcttjournal.org/2024/Volume-72%20Issue-2/IJCTT-V72I2P104.pdf>. (дата звернення: 15 April 2024).
- 16 Thomas Hamilton, «Agile Vs. DevOps – Difference Between Them,» 17 February 2024. URL: <https://www.guru99.com/agile-vs-devops.html>. (дата звернення: 15 April 2024).
- 17 Shaishav Desai, «Protecting Data Integrity and Privacy in Testing,» 1 September 2023. URL: <https://www.c-sharpcorner.com/article/protecting-data-integrity-and-privacy-in-testing/>. (дата звернення: 17 April 2024).
- 18 Yash Bansal, «23 Software Testing Trends To Look Out For In 2024,» 28 February 2024. URL: <https://www.lambdatest.com/blog/software-testing-trends/>. (дата звернення: 17 April 2024).

## References

1. Donald Firesmith, «Four Types of Shift Left Testing,» Carnegie Mellon University, 15 March 2015. Retrieved from <https://insights.sei.cmu.edu/blog/four-types-of-shift-left-testing/> [in English].
2. Pat Phelan та Renee Wells, «Adopting a "Shift Left" Strategy to Transform Technology Support Services,» 2020. Retrieved from <https://www.riministreet.com/wp-content/uploads/2020/07/Rimini-Street-Shift-Left-Strategy-Transforms-Tech-Support-Services-White-Paper.pdf> [in English].
3. Maximiliano A. Mascheroni та Emanuel Irrazábal, «Continuous Testing and Solutions for Testing Problems in Continuous Delivery: A Systematic Literature Review,» September 2018. Retrieved from

- [https://www.researchgate.net/publication/340396275\\_Continuous\\_Testing\\_and\\_Solutions\\_for\\_Testing\\_Problems\\_in\\_Continuous\\_Delivery\\_A\\_Systematic\\_Literature\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/340396275_Continuous_Testing_and_Solutions_for_Testing_Problems_in_Continuous_Delivery_A_Systematic_Literature_Review) [in English].
- 4 Altay Ataman, «Continuous Testing in 2024: Top 7 Benefits & Challenges,» January 2024. Retrieved from <https://research.aimultiple.com/continuous-testing/>. (дата звернення: 5 April 2024).
  - 5 Yogesh Solanki, «Top 21 API Automation Testing Tools that Make Automation Easy,» TestGrid, 11 March 2022. Retrieved from <https://testgrid.io/blog/api-automation-testing-tools/> [in English].
  - 6 Nico Krüger, «AI Testing and Machine Learning in Software Testing,» 24 August 2020. Retrieved from <https://www.perforce.com/blog/alm/ai-testing-and-machine-learning-software-testing> [in English].
  - 7 Gradient Ascent, «The Role of AI in Software Testing: Streamlining Processes and Reducing Errors,» 23 January 2024. Retrieved from <https://gradient-ascent.com/ai-in-software-testing/> [in English].
  - 8 Qian Cheng, Amrita Saha, Wenzhuo Yang, Chenghao Liu, Doyen Sahoo та Steven Hoi, «LOGAI: A LIBRARY FOR LOG ANALYTICS AND INTELLIGENCE,» 31 January 2023. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2301.13415.pdf> [in English].
  - 9 Abdullah A. Abonamah та Neda Abdelhamid, «Managerial insights for AI/ML implementation: a playbook for successful organizational integration,» 12 March 2024. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s44163-023-00100-5> [in English].
  - 10 Enrique DeCoss, «The Evolution of Automation Testing,» 5 March 2023. Retrieved from <https://www.accelq.com/blog/testing-evolution/> [in English].
  - 11 Leonardo Mariani, Dan Hao, Rajesh Subramanyan та Hong Zhu, «The central role of test automation in software quality assurance,» 10 July 2017. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11219-017-9383-5> [in English].
  - 12 Tahanima Chowdhury, «Test Automation Best Practices For Better Testing In 2024,» 28 March 2024. Retrieved from <https://saucelabs.com/resources/blog/test-automation-best-practices-2024> [in English].
  - 13 Piyusha Podutwar, «Shift Right Testing: Know its Benefits, Types, and Tools,» 14 November 2023. Retrieved from <https://www.lambdatest.com/learning-hub/shift-right-testing> [in English].
  - 14 Ahmad Nauman Ghazi, Kai Petersen, Elizabeth Bjarnason та Per Runeson, «Exploratory Testing: One Size Doesn't Fit All,» Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.00537.pdf> [in English].
  - 15 Parvathy Purushothaman, «Beyond Deployment: Unveiling the Dynamics of ShiftRight Testing,» 19 February 2024. Retrieved from <https://ijctjournal.org/2024/Volume-72%20Issue-2/IJCTT-V72I2P104.pdf> [in English].
  - 16 Thomas Hamilton, «Agile Vs. DevOps – Difference Between Them,» 17 February 2024. Retrieved from <https://www.guru99.com/agile-vs-devops.html> [in English].
  - 17 Shaishav Desai, «Protecting Data Integrity and Privacy in Testing,» 1 September 2023. Retrieved from <https://www.c-sharpcorner.com/article/protecting-data-integrity-and-privacy-in-testing/> [in English].
  - 18 Yash Bansal, «23 Software Testing Trends To Look Out For In 2024,» 28 February 2024. Retrieved from <https://www.lambdatest.com/blog/software-testing-trends/> [in English].

**Oleksandr Ulichev**, Ph.D tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Lyubomyr Papizh**, post-graduate

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

**Oleksandr Revniuk**, post-graduate

*Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### **Advancements in Software Testing: A Scientific Perspective**

The article aims to explore various aspects of innovation in software testing, including the latest trends, challenges, and strategies for advancing in the ever-evolving field of software development. It emphasizes the importance of adopting innovative testing practices to enhance the accuracy, efficiency, and reliability of tests. Additionally, the article seeks to provide insights into how organizations can integrate these innovative practices into their existing workflows. By doing so, it aims to help organizations stay competitive and meet the growing demands of the digital market.

The article delves into different software testing activities, such as test trials, scenarios, and scripts designed to detect defects, verify functionality, and ensure compliance with specifications. It highlights the significance of thorough testing in identifying and addressing issues early, thereby reducing the likelihood of errors in production environments. The shift-left testing approach is examined in detail, advocating for early testing such as unit testing, static code analysis, and code reviews. This method promotes the principle of "test early, test often," enabling organizations to detect and fix defects more cost-effectively and swiftly. The article also discusses the challenges in implementing innovative testing practices, such as resistance to change, outdated systems, skill gaps, and data privacy issues. It presents new trends and technologies shaping the future of

software testing, including AI and ML, big data testing, IoT testing, and robotic process automation. Strategies for overcoming challenges and staying ahead of competitors, such as continuous learning, collaboration, pilot projects, agile methodologies, and customer focus, are also explored.

The article concludes that adopting innovative testing practices is essential for improving the quality, efficiency, and competitiveness of software in today's fast-paced and dynamic digital environment. Early defect detection is fundamental to the shift-left strategy, offering substantial benefits to organizations. Identifying and fixing defects early significantly reduces costs, accelerates development cycles, and shortens time-to-market, allowing for quicker responses to market demands. Early defect detection enhances product quality and reliability, leading to a positive user experience, increased customer satisfaction, and loyalty. Organizations that proactively address defects gain customer trust and strengthen their market reputation. Continuous testing is emphasized as a crucial component in modern software development practices, ensuring quality and reliability throughout the software lifecycle.

**Software testing, Shift-Left Testing, Continuous Testing, AI and ML, Test Automation, Shift-Right Testing, Test Data Management**

*Одержано (Received) 16.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 004.4**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).16-29](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).16-29)

**О.С. Улічев**, канд. техн. наук, **О.П. Доренський**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет м. Кропивницький, Україна*

**В.П. Кулагін**, асп.

*Приватний вищий навчальний заклад "Європейський університет", м. Київ, Україна*

*e-mail: askin79@gmail.com, dorensky@ukr.net, victor@kulagin.com.ua*

## Інноваційні рішення та переваги мікросервісної архітектури програмних продуктів

У цьому дослідженні розглядається мікросервісна архітектура, як сучасний підхід до розробки програмного забезпечення, який відповідає зростаючим вимогам бізнесу та технологій. Проведено порівняльний аналіз мікросервісної архітектури з іншими архітектурними стилями, такими як монолітна та сервіс-орієнтована архітектури. Розглянуто приклади впровадження мікросервісів в індустрії на прикладі технологічних гігантів. Висвітлено використання інструментів та технологій, зокрема контейнеризації та оркестрації. Проаналізовано стандарти та найкращі практики, що сприяють ефективному впровадженню мікросервісів. Результати дослідження сприятимуть глибшому розумінню мікросервісної архітектури.

**мікросервісна архітектура, масштабованість, DevOps, контейнеризація, оркестрація, розподілені системи**

**Постановка проблеми.** У сучасному світі інформаційних технологій традиційні монолітні архітектури програмного забезпечення стають перешкодою для швидкого розвитку та масштабування систем, що не відповідає зростаючим вимогам бізнесу та користувачів. Мікросервісна архітектура виникла як рішення цих проблем, пропонуючи розподіл додатка на незалежні сервіси, але її впровадження пов'язане з новими викликами, такими як складність управління розподіленими системами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Мартін Фаулер та Джеймс Льюїс у своїй статті "Microservices" [1] формалізували концепцію мікросервісної архітектури. Вони підкреслили переваги цього підходу, зокрема підвищену гнучкість, масштабованість

та можливість незалежного розгортання сервісів, що стало фундаментом для подальших досліджень у цій сфері. Сем Ньюман у книзі "Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems" [2] детально розглядає принципи та практики розробки мікросервісів. Автор надає практичні рекомендації щодо проектування, розгортання та підтримки мікросервісних систем, акцентуючи увагу на викликах, пов'язаних із складністю управління розподіленими системами. Марк Беккерс у статті "Understanding the Potential of Modulith Architecture" [3] досліджує модулітну архітектуру як компромісний підхід між монолітами та мікросервісами. Автор підкреслює, що модулітна архітектура поєднує модульність та простоту розгортання, що робить її привабливою для малих та середніх проєктів, де впровадження мікросервісів може бути надмірно складним або невиправданим з точки зору витрат. Нікола Драгоні та інші у роботі "Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow" [4] аналізують еволюцію мікросервісної архітектури, її переваги та недоліки. Вони досліджують сучасні тенденції та перспективи розвитку мікросервісів, підкреслюючи необхідність стандартів і найкращих практик для успішного впровадження цього підходу. O'Reilly Media в опитуванні "Microservices Adoption in 2020" [5] відзначають успішне впровадження мікросервісної архітектури, що свідчить про широке прийняття та актуальність мікросервісів у сучасній індустрії програмного забезпечення, підтверджуючи ефективність цього підходу в реальних проєктах. Cloud Native Computing Foundation (CNCF) у своєму звіті "CNCF Survey 2020" [6] вказує, що 92% респондентів використовують контейнери в продакшені. Це демонструє значне поширення контейнеризації як ключової технології для розгортання мікросервісів, що підвищує ефективність та масштабованість систем. International Data Corporation (IDC) у дослідженні "IDC Forecasts a Robust Market for Enterprise Applications as Organizations Pursue Digital Era Strategies" [7] повідомляє, що 46% компаній планують замінити свої поточні системи протягом наступних трьох років. Це підкреслює постійний інтерес до нових архітектурних підходів, таких як мікросервіси, для підтримки цифрової трансформації бізнесу та підвищення конкурентоспроможності.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є надання аналізу мікросервісної архітектури, включаючи її історичний розвиток, сучасні тенденції, інструменти та технології. Будуть розглянуті практичні аспекти впровадження мікросервісної архітектури, наведені приклади успішних кейсів та обговорені альтернативні підходи, такі як модуліт. Це сприятиме отриманню повного уявлення про мікросервісну архітектуру та обґрунтованому вибору, щодо її впровадження в проєктах.

**Виклад основного матеріалу.** У наш час швидкість розвитку бізнесу та технологій постійно зростає. Конкуренція змушує компанії оперативно адаптуватися до змін ринку, впроваджуючи нові функції та сервіси для задоволення потреб користувачів. У таких умовах традиційні монолітні архітектури програмного забезпечення часто стають перешкодою для швидкого розвитку та масштабування [8].

Монолітні системи, у яких додаток є єдиним нерозривним цілим, можуть бути ефективними на початкових етапах розвитку проєкту. Проте з часом, коли система стає більш складною, зміни в одній частині коду можуть впливати на інші, що ускладнює підтримку та розвиток додатка [8]. Масштабування монолітних додатків є неефективним, оскільки зазвичай вимагає масштабування всього додатка, навіть якщо навантаження зросло лише на одну з його частин [1].

Мікросервісна архітектура виникла як відповідь на ці виклики. Вона передбачає розподіл додатка на ряд невеликих, незалежних сервісів, кожен з яких виконує конкретну бізнес-функцію та може розроблятися, розгортатися і масштабуватися незалежно від інших. Такий підхід дозволяє командам розробників працювати

автономно, обирати найкращі технології для вирішення своїх задач та швидше впроваджувати нові функції [2]. Переваги мікросервісної архітектури були продемонстровані технологічними гігантами, такими як Netflix, Amazon та Spotify, які успішно впровадили цей підхід і змогли значно покращити продуктивність та масштабованість своїх систем. Однак впровадження мікросервісів тягне за собою нові виклики, пов'язані зі складністю управління розподіленою системою, забезпеченням безпеки, моніторингом та тестуванням [9]. Також треба враховувати, що не всі організації готові до повного переходу на мікросервісну архітектуру. Для таких випадків існує концепція модулітної архітектури, модуліту (Modulith), яка поєднує переваги модульності мікросервісів з простотою монолітного розгортання. Модуліт дозволяє структурувати додаток на окремі модулі з чіткими інтерфейсами, що спрощує підтримку та розвиток системи без значних змін в інфраструктурі [3].

Мікросервісна архітектура є сучасним підходом в розробці програмного забезпечення, що передбачає розподіл додатка на набір невеликих, автономних сервісів. Кожен мікросервіс виконує конкретну бізнес-функцію та може бути розроблений, розгорнутий і масштабований незалежно від інших. Основними характеристиками мікросервісної архітектури є незалежність сервісів, легка взаємодія, децентралізоване управління даними та автономність розгортання. Кожен мікросервіс є самостійним та відповідає за певну бізнес-можливість або функцію. Це дозволяє командам розробників працювати автономно, що прискорює процес розробки та впровадження. Сервіси взаємодіють між собою через прості механізми зв'язку, зазвичай HTTP/REST, що спрощує інтеграцію та зменшує тісну пов'язаність між компонентами [10]. Кожен мікросервіс управляє власною базою даних або моделлю даних, що дозволяє уникнути конфліктів при доступі до спільних ресурсів і покращує продуктивність [11]. Мікросервіси можуть бути розгорнуті незалежно один від одного, що дозволяє швидше впроваджувати зміни та нові функції без впливу на всю систему [12]. Мікросервісна архітектура є результатом еволюції програмних архітектур та прагнення до більш гнучких, масштабованих і стійких систем. Розуміння її витоків вимагає аналізу попередніх архітектурних підходів та технологічних тенденцій, які вплинули на її формування.

У перші десятиліття розвитку програмного забезпечення більшість програмних продуктів будувалися як монолітні системи, де весь функціонал був зосереджений в одному великому кодовому масиві. Такий підхід був ефективним для невеликих проєктів, але зі зростанням складності проєктів виникали проблеми. Зміни в одній частині коду могли впливати на інші його частини. Це ускладнювало тестування та розгортання. Масштабування вимагало додавання ресурсів до всього додатка, навіть якщо лише одна його частина відчувала навантаження. Будь-яка зміна потребувала повного перерозгортання додатка, що уповільнювало цикл розробки [4].

У 2000-х роках з'явилася сервіс-орієнтована архітектура (SOA) як відповідь на обмеження монолітних систем. До переваг SOA можна віднести те, що сервіси могли бути використані в різних додатках, що сприяло повторному використанню компонентів. Також використання SOA полегшувало підтримку та розвиток окремих компонентів завдяки модульності. Проте SOA мала недоліки, зокрема складність впровадження через використання важких протоколів та складних стандартів [14].

З появою агільних методологій (Agile Manifesto) у 2001 році розробники почали шукати способи більш швидкого та більш адаптивного розвитку програмного забезпечення [15]. Рух DevOps, який виник у кінці 2000-х років, підкреслив важливість інтеграції між командами розробки та операцій для швидкого та надійного розгортання.

Ці тенденції вимагали архітектур, які підтримують швидкі цикли розробки, незалежність команд та автоматизацію процесів.

Поняття мікросервісів почало формуватися у великих технологічних компаніях, які стикалися з проблемами масштабування та гнучкості. Компанія Netflix після серйозного збою у 2008 році переосмислила свою архітектуру, перейшовши до мікросервісів для покращення стійкості та масштабованості. У 2014 році Джеймс Льюїс та Мартін Фаулер опублікували статтю, в якій формалізували концепцію мікросервісної архітектури [1].

Контейнеризація стала ключовим фактором у розвитку мікросервісів. Docker, випущений у 2013 році, дозволив легко упаковувати додатки та їх залежності в контейнери, що спростило розгортання та масштабування [16]. Інструменти оркестрації, наприклад Kubernetes, випущений Google у 2014 році, автоматизували розгортання, управління та масштабування контейнеризованих додатків [17]. Перехід від важких протоколів, таких як SOAP, до легких, наприклад RESTful API, спростив комунікацію між сервісами.

Підхід Domain-Driven Design (DDD), запропонований Еріком Евансом у 2003 році, вплинув на структурування мікросервісів навколо бізнес-доменів [15]. DDD підкреслює важливість моделювання програмного забезпечення відповідно до бізнес-процесів та концепцій.

Мікросервіси дозволяють структурувати системи навколо бізнес-потреб, що відповідає принципу закону Конвея, який стверджує, що системи проєктуються відповідно до комунікаційних структур організацій [7]. Це забезпечує можливість командам фокусуватися на конкретних бізнес-цілях та швидше реагувати на зміни ринку. Кожен мікросервіс може бути розроблений з використанням різних технологій та мов програмування, що дозволяє вибирати найкращі інструменти для вирішення конкретних задач [1]. Мікросервісна архітектура підкреслює ключові переваги: незалежність сервісів, гнучкість, масштабованість та відповідність бізнес-потребам. Вона стала відповіддю на обмеження традиційних архітектур і відкрила нові можливості для розвитку складних програмних систем.

Мікросервісна архітектура є результатом еволюції попередніх архітектурних підходів та реакцією на обмеження, з якими стикалися розробники в минулому. Далі буде проведено порівняння мікросервісної архітектури з іншими популярними архітектурними стилями, такими як монолітна архітектура, сервіс-орієнтована архітектура (SOA), модульна монолітна архітектура та безсерверна архітектура (Serverless). Це допоможе визначити, коли і чому варто обрати той чи інший підхід.

Монолітна архітектура є традиційним підходом до розробки програмного забезпечення, де весь додаток реалізований як єдиний нерозривний блок. Усі компоненти системи інтегровані в один додаток, який розгортається як єдиний артефакт [2]. Вона має ряд переваг. На початкових етапах проєкту монолітні додатки легше розробляти, тестувати та розгортати, оскільки вся логіка знаходиться в одному місці [2]. Відсутність розподіленої системи спрощує процес тестування, оскільки немає необхідності враховувати мережеві взаємодії між сервісами. Уся логіка зосереджена в одному репозиторії, що може спростити управління версіями та залежностями. Але також треба враховувати і недоліки монолітної архітектури. Масштабування моноліту часто означає копіювання всього додатку на декілька серверів, що може бути неефективним, якщо лише частина системи потребує додаткових ресурсів [2]. Будь-які зміни в коді вимагають повторного розгортання всього додатку, що сповільнює впровадження нових функцій [4]. Використання однієї технології для всього додатку може обмежувати можливості команди вибирати найкращі інструменти для конкретних

задач [10]. Зі зростанням розміру коду монолітні додатки стають важкими для розуміння та підтримки.

Сервіс-орієнтована архітектура (SOA) – це підхід, у якому додаток складається з набору взаємодіючих сервісів, що надають функціональність через стандартизовані інтерфейси та протоколи [18]. SOA була популярною у 2000-х роках і стала попередником мікросервісної архітектури. Вона має багато спільного з мікросервісною архітектурою. Обидва підходи базуються на розподілі додатку на окремі сервіси [18]. Сервіси можуть бути використані в різних контекстах та додатках. Фокус на бізнес-процеси. Обидві архітектури орієнтовані на моделювання бізнес-процесів через сервіси. Але SOA має і відмінності від мікросервісної архітектури. У SOA сервіси часто більші та виконують більш комплексні функції, тоді як мікросервіси орієнтовані на конкретні задачі [13]. SOA зазвичай використовує важкі протоколи, такі як SOAP, які можуть бути складними у налаштуванні та підтримці. Мікросервіси надають перевагу легким протоколам, таким як REST або gRPC [10]. SOA часто передбачає наявність центральної шини сервісів (ESB), що може стати "вузьким місцем" та єдиною точкою відмови. Мікросервіси прагнуть до децентралізації та незалежності. У мікросервісах команди мають більше свободи у виборі технологій, тоді як SOA часто обмежена корпоративними стандартами. Вона добре підходить для великих підприємств, які потребують інтеграції різних систем [18]. Використання загальноприйнятих стандартів сприяє сумісності та взаємодії. До недоліків можна віднести те, що провадження SOA може бути складним та дорогим, вимагаючи значних зусиль на налаштування та підтримку [13]. Крім того, використання важких протоколів може впливати на продуктивність системи.

Модульна монолітна архітектура поєднує підхід моноліту з модульністю. Додаток розбивається на окремі модулі з чітко визначеними інтерфейсами, але все ще розгортається як єдиний артефакт [10]. Модульність сприяє кращому розумінню коду та спрощує навігацію. Характеризується відсутністю складної інфраструктури для управління розподіленими сервісами. Надає можливість тестувати модулі окремо в контексті єдиного додатку. З недоліків можна виділити неможливість масштабувати окремі модулі незалежно. Також існує ризик створення тісно пов'язаних модулів, що може призвести до складнощів у підтримці. Крім того, зміни в одному модулі можуть вимагати повторного розгортання всього додатку.

Безсерверна архітектура (Serverless) або Функції як Сервіс (FaaS), — це модель, де розробники пишуть невеликі фрагменти коду (функції), які виконуються у відповідь на певні події, а управління серверами здійснюється провайдером хмарних послуг [13]. До переваг можна віднести зниження операційних витрат, так як плата здійснюється лише за фактичний час виконання функцій, швидке розгортання та автоматичне масштабування. Хмарний провайдер автоматично масштабує ресурси залежно від навантаження. Із недоліків виділемо обмеження продуктивності ("холодний старт" функцій може призводити до затримок) та залежність від провайдера. Можлива прив'язка до конкретної хмарної платформи, що ускладнює міграцію. Також багато провайдерів встановлюють обмеження на час виконання функцій.

З вищесказаного можна зробити висновок, що вибір архітектурного стилю залежить від багатьох факторів: розміру проєкту, досвіду команди, вимог до масштабованості, бюджетних обмежень тощо. Мікросервісна архітектура забезпечує високу гнучкість та масштабованість, але вимагає складної інфраструктури та досвідчених команд [3, 9]. Монолітна архітектура підходить для невеликих проєктів або стартапів, де швидкість розробки важливіша за масштабованість [10]. SOA добре підходить для великих підприємств, що потребують інтеграції різних систем, але її

складність може бути перешкодою [18]. Модульна монолітна архітектура може бути компромісом між монолітом та мікросервісами, дозволяючи структурувати код без складнощів розподілених систем. Безсерверна архітектура ідеальна для подійно-орієнтованих додатків та може знизити витрати, але погано підходить для довготривалих процесів [13].

Таблиця 1 - Порівняльна таблиця архітектурних стилів проектування програмного забезпечення

| Параметр                   | Монолітна Архітектура | Сервіс-Орієнтована Архітектура (SOA) | Мікросервісна Архітектура | Модульна Монолітна Архітектура | Безсерверна Архітектура (Serverless) |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Розгортання                | Єдиний артефакт       | Розподілені сервіси                  | Розподілені мікросервіси  | Єдиний артефакт                | Функції на хмарній платформі         |
| Масштабованість            | Обмежена              | Складна                              | Висока                    | Обмежена                       | Автоматична                          |
| Управління Інфраструктурою | Просте                | Складне                              | Складне                   | Просте                         | Мінімальне                           |
| Гнучкість Розробки         | Низька                | Середня                              | Висока                    | Середня                        | Висока                               |
| Вартість                   | Низька на старті      | Висока                               | Середня                   | Низька                         | Залежить від використання            |
| Технологічна Незалежність  | Обмежена              | Обмежена корпоративними стандартами  | Висока                    | Обмежена                       | Висока                               |

Джерело: розроблено авторами

Протягом останніх десяти років популярність мікросервісної архітектури значно зросла серед розробників програмного забезпечення. Це пов'язано з потребою в масштабованих, гнучких та легко підтримуваних системах. Згідно з опитуванням [5], проведеним O'Reilly Media у 2020 році серед своїх читачів, 61% респондентів використовують мікросервіси більше року, ще 28% мінімум 3 роки. Про успішність впровадження мікросервісів кажуть дані, що 54% компаній вважають впровадження мікросервісів «переважно успішним», тоді як 10% абсолютно успішним, а загалом 92% опитаних відмічають хоча б мінімальний успіх.

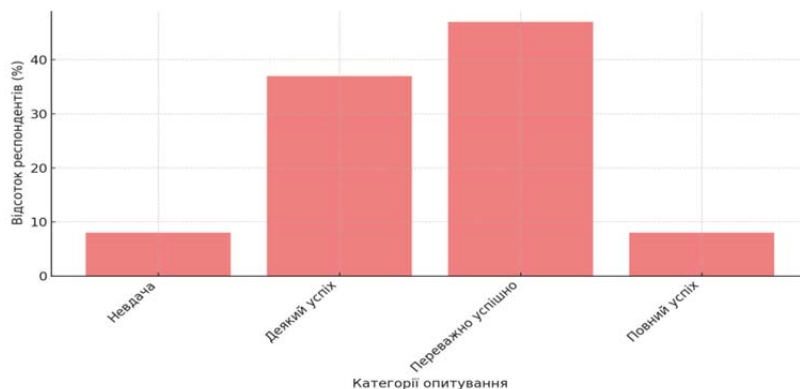


Рисунок 1 – Результати опитування щодо впровадження мікросервісів

Джерело: розроблено авторами на підставі [5]

Cloud Native Computing Foundation (CNCF) у своєму звіті за 2020 рік зазначає [6], що 92% респондентів використовують контейнери у продакшені, що є ключовим показником впровадження мікросервісів, оскільки контейнери часто використовуються для їх розгортання.

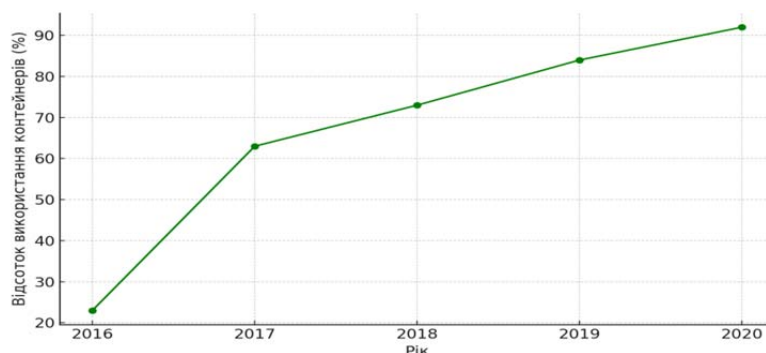


Рисунок 2 – Динаміка росту використання контейнерів в продакшені

*Джерело: розроблено авторами на підставі [6]*

Багато компаній активно працюють над переходом від монолітних архітектур до більш модульних і гнучких підходів. Це пов'язано з необхідністю швидшого виведення продуктів на ринок та легшого масштабування. IDC SaaSPath Survey 2023 [7] показує, що 46% компаній планують заміну своїх поточних систем протягом наступних трьох років, що свідчить про постійний інтерес до нових архітектур, таких як хмарні рішення та мікросервіси. Це підкреслює важливість модульності та гнучкості для підприємств у цифрову епоху.

Спираючись на тенденції та дослідження попередніх років, можна зробити висновки, що мікросервісна архітектура продовжує залишатися одним із найпопулярніших підходів. Багато організацій переводять свої монолітні додатки на мікросервіси для підвищення масштабованості та гнучкості. Безсерверні (Serverless) та подієво-орієнтовані (Event-Driven) архітектури також набувають все більшої популярності, особливо в контексті хмарних обчислень та Інтернету речей (IoT). Контейнеризація та оркестрація за допомогою таких інструментів, як Docker і Kubernetes, стали стандартом для розгортання та управління додатками, що свідчить про стійкий тренд до зростання використання мікросервісної архітектури у продакшн середовищах.

Сучасна мікросервісна архітектура значною мірою залежить від різноманітних інструментів та технологій, які підтримують розробку, розгортання та управління розподіленими системами.

Впровадження мікросервісів стало можливим завдяки розвитку контейнеризації, оркестрації, сервісних сіток та інших ключових технологій. Контейнеризація є фундаментальною технологією для мікросервісної архітектури, яка дозволяє ізолювати додатки та їх залежності в окремих контейнерах. Docker є однією з найпопулярніших платформ контейнеризації, що забезпечує консистентність середовища розробки та розгортання, спрощує перенесення додатків між різними середовищами та полегшує масштабування [16]. Використання контейнерів дозволяє запускати кожен мікросервіс у власному ізольованому середовищі, що підвищує безпеку та стабільність системи. Зі зростанням кількості мікросервісів управління контейнерами стає складним завданням. Системи оркестрації контейнерів, такі як Kubernetes, автоматизують розгортання, управління та масштабування контейнеризованих додатків [17]. Kubernetes забезпечує автоматичне розгортання та відновлення контейнерів, балансування навантаження та управління конфігураціями, що дозволяє підтримувати високу доступність та продуктивність системи. Компанія Airbnb перейшла на використання Kubernetes для

управління своїми мікросервісами, що дозволило покращити стійкість та масштабованість їх системи [19].

Сервісні сітки (Service Mesh) є інфраструктурним шаром, який відповідає за безпечну та надійну комунікацію між сервісами в мікросервісній архітектурі. Інструменти на кшталт Istio та Linkerd надають можливості для балансування навантаження, маршрутизації трафіку, забезпечення безпеки та моніторингу між сервісами [20]. Використання сервісних сіток спрощує управління складними мережевими взаємодіями та підвищує спостережуваність системи. Компанія PayPal використовує Istio для управління комунікацією між своїми мікросервісами, що покращує безпеку та моніторинг їх системи [21].

Ефективне управління мікросервісами вимагає потужних інструментів для моніторингу та логування. Системи на кшталт Prometheus для збору метрик та Grafana для їх візуалізації дозволяють відстежувати стан сервісів та швидко реагувати на проблеми. ELK Stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana) використовується для централізованого збору, аналізу та візуалізації логів, що спрощує діагностику та налагодження системи [22].

Автоматизація процесів розробки та розгортання є критично важливою для мікросервісної архітектури. Інструменти для безперервної інтеграції та доставки (CI/CD), такі як Jenkins, GitLab CI/CD та CircleCI, дозволяють автоматизувати тестування та розгортання сервісів, що прискорює цикл розробки та підвищує якість програмного забезпечення.

Інструменти та технології, що підтримують контейнеризацію, оркестрацію, сервісні сітки, моніторинг та автоматизацію CI/CD, є невід'ємною частиною сучасної мікросервісної архітектури. Вони забезпечують необхідну інфраструктуру для розробки, розгортання та управління розподіленими системами, дозволяючи компаніям ефективно масштабувати та підтримувати свої сервіси.

Одним із найвідоміших прикладів успішного впровадження мікросервісної архітектури є компанія Netflix. Переходячи від монолітної архітектури, Netflix зміг масштабувати свій сервіс для обслуговування понад 200 мільйонів користувачів по всьому світу [23]. Мікросервіси дозволили компанії підвищити стійкість системи, оскільки збій одного сервісу не впливає на роботу всієї платформи. Крім того, незалежні команди можуть розробляти та розгортати сервіси без залежності від інших команд, що прискорює впровадження змін [2]. Можливість масштабувати окремі сервіси забезпечує ефективне використання ресурсів.

Компанія Amazon також перейшла до мікросервісної архітектури для вирішення проблем масштабованості та продуктивності. Розбивши свою велику кодову базу на дрібні сервіси, вона досягла покращення продуктивності та спростила процеси розробки та підтримки.

Компанія Uber зіткнулася з проблемами швидкого зростання та необхідністю масштабувати свій сервіс у різних країнах і містах. Перехід на мікросервіси дозволив Uber швидко адаптуватися до локальних вимог та регуляцій, забезпечуючи гнучкість і масштабованість системи [2].

Банки та фінансові установи активно впроваджують мікросервісну архітектуру для покращення своїх цифрових сервісів. Наприклад, Goldman Sachs перейшов до мікросервісів для свого платіжного сервісу, що дозволило швидше впроваджувати нові функції та забезпечувати високу доступність системи. ING Bank успішно впровадив мікросервіси та хмарні технології, що дозволило зменшити час виходу на ринок нових продуктів та покращити клієнтський досвід.

Компанії електронної комерції, такі як eBay та Alibaba, використовують мікросервіси для обробки великої кількості транзакцій та забезпечення безперебійної роботи платформи. Alibaba завдяки мікросервісам змогла обробляти пікові навантаження під час великих розпродажів, таких як День самотніх, забезпечуючи високу продуктивність системи.

Телекомунікаційні компанії також впроваджують мікросервісну архітектуру для покращення своїх цифрових сервісів. Наприклад, Telefónica використовує мікросервіси для підвищення масштабованості та швидкості впровадження нових послуг, що дозволяє швидше реагувати на потреби ринку.

У автомобільній промисловості компанії Volkswagen та Tesla застосовують мікросервіси для своїх інформаційно-розважальних систем та сервісів автономного водіння. Мікросервісна архітектура дозволяє швидко оновлювати програмне забезпечення та додавати нові функції, що є критичним у контексті швидкого розвитку технологій [24].

У сфері охорони здоров'я мікросервіси застосовуються для створення електронних медичних записів та телемедицини. Компанія Philips Healthcare використовує мікросервісну архітектуру для своїх цифрових рішень, що покращує інтеграцію та обмін даними між різними системами, забезпечуючи більш ефективне надання медичних послуг.

Платформи дистанційного навчання, такі як Coursera та Udey, використовують мікросервіси для забезпечення масштабованості та персоналізації навчального досвіду. Це дозволяє обслуговувати велику кількість користувачів та адаптувати навчальні матеріали під індивідуальні потреби.

Впровадження мікросервісної архітектури приносить значні переваги для індустрії. Зокрема, незалежні сервіси дозволяють швидше впроваджувати нові функції, що скорочує час виходу на ринок [12]. Можливість масштабувати лише ті сервіси, які цього потребують, підвищує ефективність використання ресурсів. Стійкість системи забезпечується тим, що збій одного сервісу не призводить до зупинки всього додатку. Крім того, кожен сервіс може бути розроблений з використанням найкращих технологій для конкретної задачі, що підвищує гнучкість технологій [25].

Попри численні переваги, компанії стикаються з певними викликами при впровадженні мікросервісної архітектури. Складність управління розподіленою системою вимагає розвинених систем моніторингу та оркестрації. Розподілена архітектура збільшує поверхню атаки, що підвищує вимоги до безпеки системи. Крім того, необхідні культурні зміни та трансформація організаційної структури та процесів для успішного впровадження мікросервісів [2].

Мікросервісна архітектура, як складна та розподілена система, потребує дотримання певних стандартів та найкращих практик для забезпечення її ефективності, надійності та масштабованості. Cloud Native Computing Foundation (CNCF) є однією з провідних організацій, що сприяє розвитку хмарних технологій та мікросервісної архітектури. CNCF об'єднує проекти з відкритим кодом, які допомагають розробникам створювати хмарні додатки. Основною метою CNCF є стандартизація та підтримка стандартів для хмарних і мікросервісних технологій. Організація підтримує екосистему з відкритим кодом, включаючи такі проекти, як Kubernetes, Prometheus та Envoy. Також CNCF об'єднує розробників та організації для обміну досвідом і найкращими практиками. Серед внесків CNCF у мікросервіси можна виділити Kubernetes, який став стандартом для оркестрації контейнерів [26]. Prometheus став стандартом для моніторингу та оповіщення в мікросервісних системах, а Envoy функціонує як проксі-сервер і сервісна сітка для управління трафіком.

Методологія Twelve-Factor App, розроблена інженерами компанії Heroku, описує набір найкращих практик для побудови сучасних, масштабованих веб-додатків. Хоча вона не була створена спеціально для мікросервісів, її принципи широко застосовуються в цій архітектурі. Дванадцять факторів включають використання єдиної кодової бази, явне декларування та ізоляцію залежностей, зберігання конфігурації в середовищі, трактування сторонніх сервісів як приєднаних ресурсів та чітке розділення стадій побудови, запуску та виконання. Також важливими є запуск додатка як одного або більше безстанних процесів, експортування сервісів через портове зв'язування, масштабування за допомогою процесів моделі, швидкий старт та граційне завершення процесів, збереження паритету між середовищами розробки та продакшену, трактування логів як потоків подій та виконання адміністративних завдань як однократних процесів.

Впровадження практик DevOps та Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD) є критичним для успішної роботи з мікросервісами. Принципи DevOps включають співпрацю між командами розробників та операційних інженерів, автоматизацію процесів розробки, тестування та розгортання, а також постійний моніторинг системи з швидким реагуванням на проблеми [27]. Практики CI/CD передбачають регулярне інтегрування коду в спільну кодову базу з автоматичним тестуванням (Continuous Integration) та автоматичне розгортання перевіреного коду в продакшен-середовище (Continuous Deployment).

Правильний дизайн API та вибір протоколів комунікації є ключовими для ефективної взаємодії між мікросервісами. RESTful API використовує стандартизовані методи HTTP, такі як GET, POST, PUT, DELETE, та ресурсно-орієнтований підхід для відображення бізнес-об'єктів на URL [28]. Протокол gRPC забезпечує високу продуктивність завдяки використанню HTTP/2 та бінарного формату даних, а також підтримує схемну комунікацію через Protocol Buffers. Архітектура, що керується подіями (Event-Driven Architecture), використовує асинхронну комунікацію за допомогою повідомлень та черг для передачі даних. Популярними платформами для обробки подій є Apache Kafka та RabbitMQ.

Безпека є критичним аспектом у розподілених системах. Практики безпеки включають аутентифікацію та авторизацію з використанням протоколів OAuth 2.0 та OpenID Connect [29], шифрування комунікацій за допомогою TLS для захисту трафіку, а також безпечне зберігання секретів із застосуванням інструментів на кшталт HashiCorp Vault.

Спостережуваність системи (observability) — це її здатність надавати інформацію про внутрішній стан. Практики включають збір та аналіз ключових метрик, відстеження запитів через різні сервіси за допомогою трасування (наприклад, OpenTracing, Jaeger), а також централізоване зберігання та аналіз логів.

Тестування в мікросервісній архітектурі є складним через розподіленість системи. Практики включають контрактне тестування для перевірки взаємодії між сервісами, автоматизоване тестування з використанням спеціалізованих інструментів та тестування стійкості шляхом інжекції збоїв для перевірки реакції системи (Chaos Engineering).

Дотримання стандартів та найкращих практик є критичним для успішного впровадження та підтримки мікросервісної архітектури. Організації, такі як CNCF, та спільнота розробників постійно працюють над розробкою та вдосконаленням цих практик, що допомагає компаніям ефективно будувати та масштабувати свої системи.

**Висновки.** Мікросервісна архітектура стала ключовою технологією у сучасній розробці програмного забезпечення, пропонуючи нові можливості для масштабованості, гнучкості та швидкості впровадження. Протягом цього дослідження ми розглянули різні аспекти мікросервісів, їх порівняння з іншими архітектурними стилями, впровадження в

індустрії, інструменти та технології, стандарти та найкращі практики. Окрім того, ми розглянули практичні приклади успішного впровадження мікросервісів.

Порівняння з іншими архітектурними стилями показало, що мікросервісна архітектура відрізняється від монолітних та сервіс-орієнтованих архітектур своєю гранулярністю та незалежністю сервісів. Монолітні системи часто страждають від складності підтримки та обмеженої масштабованості, тоді як мікросервіси дозволяють розробникам створювати автономні сервіси з чітко визначеними інтерфейсами. Порівняно з SOA, мікросервіси мають більш легковагу природу та не залежать від складних корпоративних сервісних автобусів.

Впровадження в індустрії продемонструвало, що мікросервіси стали стандартом для багатьох технологічних гігантів. Компанії, такі як Netflix, Amazon, Uber, Spotify та Walmart, успішно перейшли на мікросервісну архітектуру, що дозволило їм масштабувати свої системи, підвищити стійкість та прискорити впровадження нових функцій.

Інструменти та технології відіграють критичну роль у підтримці мікросервісної архітектури. Контейнеризація з використанням Docker дозволяє ізолювати сервіси та забезпечує консистентність середовища. Оркестрація за допомогою Kubernetes спрощує управління контейнерами, автоматизуючи розгортання та масштабування. Сервісні сітки, такі як Istio та Linkerd, забезпечують керування комунікацією між сервісами, підвищуючи безпеку та спостережуваність.

Стандарти та найкращі практики були розроблені для полегшення впровадження та експлуатації мікросервісів. Cloud Native Computing Foundation (CNCF) просуває стандарти та інструменти з відкритим кодом для хмарних додатків. Методологія Twelve-Factor App надає рекомендації щодо побудови масштабованих та підтримуваних додатків. DevOps та CI/CD практики сприяють автоматизації процесів розробки та розгортання, підвищуючи ефективність команд.

Дослідження показало, що мікросервісна архітектура стала важливим інструментом для організацій, які прагнуть підвищити масштабованість, гнучкість та швидкість інновацій. Однак її успішне впровадження вимагає ретельного аналізу переваг та викликів, готовності до культурних та організаційних змін, а також впровадження сучасних інструментів та практик. Майбутнє мікросервісної архітектури виглядає перспективним, з новими технологічними розробками та практиками, що сприятимуть ще більш ефективному управлінню та розробці складних систем. Організації, які активно адаптуються до цих змін та впроваджують інновації, зможуть залишатися конкурентоспроможними та успішно реагувати на виклики сучасного технологічного середовища.

## Список літератури

1. M. Fowler and J. Lewis, "Microservices," martinowler.com, Mar. 2014. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. URL: <https://martinowler.com/articles/microservices.html>
2. S. Newman, Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2021.
3. M. Beckers, "Understanding the potential of Modulith architecture," Worldline Tech Blog, Jan. 2024. Accessed Oct. 2, 2023. [Online]. URL: <https://blog.worldline.tech/2024/01/23/modulith.html>
4. N. Dragoni et al., "Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow," in Present and Ulterior Software Engineering, M. Mazzara and B. Meyer, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2017. P. 195–216, doi: 10.1007/978-3-319-67425-4\_12.
5. O'Reilly Media, "Microservices Adoption in 2020," O'Reilly Radar, 2020. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. URL: <https://www.oreilly.com/radar/microservices-adoption-in-2020/>
6. Cloud Native Computing Foundation, "CNCF Survey 2020," CNCF, Nov. 2020. Accessed Oct. 3, 2023. [Online]. URL: [https://www.cncf.io/wp-content/uploads/2020/11/CNCF\\_Survey\\_Report\\_2020.pdf](https://www.cncf.io/wp-content/uploads/2020/11/CNCF_Survey_Report_2020.pdf)

7. International Data Corporation (IDC), "IDC Forecasts a Robust Market for Enterprise Applications as Organizations Pursue Digital Era Strategies," IDC, Sep. 2023. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS51107323>
8. M. Fowler, *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2012.
9. I. Nadareishvili, R. Mitra, M. McLarty, and M. Amundsen, *Microservice Architecture: Aligning Principles, Practices, and Culture*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2016.
10. C. Richardson, *Microservices Patterns: With Examples in Java*. Shelter Island, NY, USA: Manning Publications, 2018.
11. M. E. Conway, "How Do Committees Invent?," *Datamation*, vol. 14, no. 4. P. 28–31, Apr. 1968.
12. L. Chen, "Continuous Delivery: Huge Benefits, but Challenges Too," *IEEE Softw.*, vol. 32, no. 2. P. 50–54, Mar./Apr. 2015, doi: 10.1109/MS.2015.27.
13. A. E. Eivy, "Be Wary of the Economics of 'Serverless' Cloud Computing," *IEEE Cloud Comput.*, vol. 4, no. 2. P. 6–12, Mar./Apr. 2017, doi: 10.1109/MCC.2017.32.
14. E. Evans, *Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2003.
15. J. Humble and J. Molesky, "Why Enterprises Must Adopt DevOps to Enable Continuous Delivery," *Cutter IT J.*, vol. 24, no. 8. P. 6–12, Aug. 2011.
16. D. Merkel, "Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment," *Linux Journal*, vol. 2014, no. 239, Mar. 2014. Accessed Oct. 5, 2023. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2600239.2600241>
17. B. Burns, B. Grant, D. Oppenheimer, E. Brewer, and J. Wilkes, "Borg, Omega, and Kubernetes," *Commun. ACM*, vol. 59, no. 5. P. 50–57, May 2016, doi: 10.1145/2890784.
18. T. Erl, *Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2005.
19. Airbnb Engineering, "Dynamic Kubernetes Cluster Scaling at Airbnb," *Airbnb Engineering & Data Science Blog*, May 23, 2022. Accessed Oct. 4, 2023. [Online]. Available: <https://medium.com/airbnb-engineering/dynamic-kubernetes-cluster-scaling-at-airbnb-d79ae3afa132>
20. W. Morgan, "What Is a Service Mesh?," *Buoyant*, 2017. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. Available: <https://buoyant.io/what-is-a-service-mesh>
21. R. Hincapie, "The Ultimate Guide to Becoming an Istio Certified Administrator," *Medium*, May 19, 2023. Accessed Oct. 2, 2023. [Online]. URL: <https://richincapie.medium.com/the-ultimate-guide-to-becoming-an-istio-certified-administrator-160b845e7490>
22. C. Gormley and Z. Tong, *Elasticsearch: The Definitive Guide*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2015.
23. A. Cockcroft, "Migrating to Microservices," *Nginx*, 2015. Accessed Oct. 10, 2023. [Online]. URL: <https://www.nginx.com/blog/microservices-at-netflix-architectural-best-practices/>
24. M. Broy, I. H. Krüger, A. Pretschner, and C. Salzmänn, "Engineering Automotive Software," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 2. P. 356–373, Feb. 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.888386.
25. S. Tilkov and S. Vinoski, "Node.js: Using JavaScript to Build High-Performance Network Programs," *IEEE Internet Comput.*, vol. 14, no. 6. P. 80–83, Nov./Dec. 2010, doi: 10.1109/MIC.2010.145.
26. B. Burns, J. Beda, and K. Hightower, *Kubernetes: Up and Running*, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2019.
27. C. Ebert and G. Gallardo, "DevOps," *IEEE Softw.*, vol. 33, no. 3. P. 94–100, May/Jun. 2016, doi: 10.1109/MS.2016.68.
28. R. T. Fielding and R. N. Taylor, "Principled Design of the Modern Web Architecture," *ACM Trans. Internet Technol.*, vol. 2, no. 2. P. 115–150, May 2002, doi: 10.1145/514183.514185.
29. D. Hardt, "The OAuth 2.0 Authorization Framework," *RFC 6749*, Oct. 2012, doi: 10.17487/RFC6749.

## References

1. M. Fowler and J. Lewis, "Microservices," *martinfowler.com*, Mar. 2014. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. Retrieved from <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>
2. S. Newman, *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2021.
3. M. Beckers, "Understanding the potential of Modulith architecture," *Worldline Tech Blog*, Jan. 2024. Accessed Oct. 2, 2023. [Online]. Retrieved from <https://blog.worldline.tech/2024/01/23/modulith.html>
4. N. Dragoni et al., "Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow," in *Present and Ulterior Software Engineering*, M. Mazzara and B. Meyer, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2017. P. 195–216, doi: 10.1007/978-3-319-67425-4\_12.

5. O'Reilly Media, "Microservices Adoption in 2020," O'Reilly Radar, 2020. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. Retrieved from <https://www.oreilly.com/radar/microservices-adoption-in-2020/>
6. Cloud Native Computing Foundation, "CNCF Survey 2020," CNCF, Nov. 2020. Accessed Oct. 3, 2023. [Online]. Retrieved from [https://www.cncf.io/wp-content/uploads/2020/11/CNCF\\_Survey\\_Report\\_2020.pdf](https://www.cncf.io/wp-content/uploads/2020/11/CNCF_Survey_Report_2020.pdf)
7. International Data Corporation (IDC), "IDC Forecasts a Robust Market for Enterprise Applications as Organizations Pursue Digital Era Strategies," IDC, Sep. 2023. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. Retrieved from <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS51107323>
8. M. Fowler, Patterns of Enterprise Application Architecture. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2012.
9. I. Nadareishvili, R. Mitra, M. McLarty, and M. Amundsen, Microservice Architecture: Aligning Principles, Practices, and Culture. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2016.
10. C. Richardson, Microservices Patterns: With Examples in Java. Shelter Island, NY, USA: Manning Publications, 2018.
11. M. E. Conway, "How Do Committees Invent?," Datamation, vol. 14, no. 4. P. 28–31, Apr. 1968.
12. L. Chen, "Continuous Delivery: Huge Benefits, but Challenges Too," IEEE Softw., vol. 32, no. 2. P. 50–54, Mar./Apr. 2015, doi: 10.1109/MS.2015.27.
13. A. E. Eivy, "Be Wary of the Economics of 'Serverless' Cloud Computing," IEEE Cloud Comput., vol. 4, no. 2. P. 6–12, Mar./Apr. 2017, doi: 10.1109/MCC.2017.32.
14. E. Evans, Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2003.
15. J. Humble and J. Molesky, "Why Enterprises Must Adopt DevOps to Enable Continuous Delivery," Cutter IT J., vol. 24, no. 8. P. 6–12, Aug. 2011.
16. D. Merkel, "Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment," Linux Journal, vol. 2014, no. 239, Mar. 2014. Accessed Oct. 5, 2023. [Online]. Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2600239.2600241>
17. B. Burns, B. Grant, D. Oppenheimer, E. Brewer, and J. Wilkes, "Borg, Omega, and Kubernetes," Commun. ACM, vol. 59, no. 5. P. 50–57, May 2016, doi: 10.1145/2890784.
18. T. Erl, Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2005.
19. Airbnb Engineering, "Dynamic Kubernetes Cluster Scaling at Airbnb," Airbnb Engineering & Data Science Blog, May 23, 2022. Accessed Oct. 4, 2023. [Online]. Retrieved from <https://medium.com/airbnb-engineering/dynamic-kubernetes-cluster-scaling-at-airbnb-d79ae3afa132>
20. W. Morgan, "What Is a Service Mesh?," Buoyant, 2017. Accessed Oct. 1, 2023. [Online]. Available: <https://buoyant.io/what-is-a-service-mesh>
21. R. Hincapie, "The Ultimate Guide to Becoming an Istio Certified Administrator," Medium, May 19, 2023. Accessed Oct. 2, 2023. [Online]. Retrieved from <https://richincapie.medium.com/the-ultimate-guide-to-becoming-an-istio-certified-administrator-160b845e7490>
22. C. Gormley and Z. Tong, Elasticsearch: The Definitive Guide. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2015.
23. A. Cockcroft, "Migrating to Microservices," Nginx, 2015. Accessed Oct. 10, 2023. [Online]. Retrieved from <https://www.nginx.com/blog/microservices-at-netflix-architectural-best-practices/>
24. M. Broy, I. H. Krüger, A. Pretschner, and C. Salzmann, "Engineering Automotive Software," Proc. IEEE, vol. 95, no. 2. P. 356–373, Feb. 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.888386.
25. S. Tilkov and S. Vinoski, "Node.js: Using JavaScript to Build High-Performance Network Programs," IEEE Internet Comput., vol. 14, no. 6. P. 80–83, Nov./Dec. 2010, doi: 10.1109/MIC.2010.145.
26. B. Burns, J. Beda, and K. Hightower, Kubernetes: Up and Running, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2019.
27. C. Ebert and G. Gallardo, "DevOps," IEEE Softw., vol. 33, no. 3. P. 94–100, May/Jun. 2016, doi: 10.1109/MS.2016.68.
28. R. T. Fielding and R. N. Taylor, "Principled Design of the Modern Web Architecture," ACM Trans. Internet Technol., vol. 2, no. 2. P. 115–150, May 2002, doi: 10.1145/514183.514185.
29. D. Hardt, "The OAuth 2.0 Authorization Framework," RFC 6749, Oct. 2012, doi: 10.17487/RFC6749.

**Oleksandr Ulichev**, PhD tech. sci., **Oleksandr Dorenskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Victor Kulahin**, post-graduate

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

### **Innovative Solutions and Benefits of Microservice Architecture for Software Products**

The rapid advancement of technology and increasing market competition compel businesses to adapt swiftly by implementing new features and services to meet user demands. Traditional monolithic software architectures often hinder this agility due to challenges in scalability and maintenance. This article aims to

analyze microservice architecture to solve these challenges, exploring its historical development, current trends, practical implementation aspects, and comparison with alternative architectural styles such as modolith architecture.

The study examines the limitations of monolithic architectures in handling growing complexity and scaling requirements. It explores the emergence of microservice architecture, highlighting core characteristics like independent services, decentralized data management, and autonomous deployment. The evolution influenced by agile methodologies and DevOps practices is discussed. A comparative analysis with other architectural styles—including monolithic, service-oriented, modular monolithic, and serverless architectures—identifies contexts where microservices are most beneficial. The research reviews essential tools and technologies for implementing microservices, such as Docker for containerization, Kubernetes for orchestration, and service meshes like Istio and Linkerd. Practical cases from industry leaders like Netflix and Amazon illustrate successful adoption and the challenges faced during implementation.

Findings indicate that while microservice architecture offers significant scalability, flexibility, and rapid deployment advantages, it also introduces complexities related to distributed system management and security. The study emphasizes the importance of adopting best practices and standards, such as those promoted by the Cloud Native Computing Foundation and utilizing modern tools to mitigate these challenges. For organizations where full microservices adoption may be impractical, modolith architecture is a viable alternative that combines modularity with deployment simplicity. The article concludes that the choice of architecture should be carefully aligned with the project's specific needs, resources, and long-term strategic goals.

**microservice architecture, containerization, scalability, orchestration, distributed systems, DevOps**

*Одержано (Received) 16.09..2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 03.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 629.083**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.29-39](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.29-39)

**О.Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук, **В.А. Готович**, доц., канд. техн. наук, **В.О. Бонар**, асп.  
*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

*e-mail: oleglashuk@ukr.net*

**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*

**Л.П. Матійчук**, доц., д-р екон. наук

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

## Концепція дистанційної діагностики технічного стану транспортних засобів в процесі їх експлуатації

У статті розглянуто концепцію дистанційної діагностики транспортних засобів в процесі їх експлуатації та основні аспекти автоматичного зчитування даних за допомогою протоколу OBD2 з ECU в режимі реального часу з подальшою їх передачею на загальний сервер. Продемонстровано як отримані дані тестуються на наявність в них аномалій за допомогою методів реконструкції та виявленням аномалій у групах даних з подальшим сповіщенням користувача. Представлено архітектуру комунікації мобільного та веб додатків з серверною частиною при діагностиці транспортних засобів.

**транспортний засіб, дистанційна діагностика, технічний стан, самодіагностика OBD2, код помилки, аномалія, в наборі даних**

© О.Л. Ляшук, В.А. Готович, В.О. Бонар, В.В. Аулін, А.В. Гриньків, Л.П. Матійчук, 2024

**Постановка проблеми.** На 2024 рік кількість автомобілів на планеті приблизно досягає 1.475 мільярдів [1], що є вражаючою цифрою. Стрімке зростання кількості транспортних засобів (ТЗ) зумовлює необхідність якісного контролю технічного стану в процесі їх експлуатації для раннього виявлення несправностей.

В даній статті пропонується концепція дистанційної діагностики ТЗ в процесі їх експлуатації, що передбачає автоматичний збір інформації про внутрішній стан різних компонентів автомобіля з подальшою можливістю його дистанційного моніторингу. Для комплексного аналізу потрібно враховувати специфіку автомобіля та його тип. Загалом, автомобілі можна поділити на наступні класи [2]:

- з бензиновим двигуном внутрішнього згоряння (англ., Internal petrol combustion engine (ESS));
- з дизельним двигуном внутрішнього згоряння (англ., Diesel internal combustion engine (DSL));
- м'який гібридний електромобіль (англ., Mild hybrid electric vehicle (MHEV));
- гібридний електромобіль (англ., Hybrid electric vehicle (HEV));
- гібридний електромобіль, що підключається (англ., Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV));
- з двигуном, що працює на стисненому природному газі (англ., Compressed natural gas engine (CNG));
- з двигуном на зрідженому нафтовому газі (англ., Liquefied petroleum gas engine (LPG));
- електромобіль з акумулятором (англ., 100% electric motor (battery electric vehicle – BEV));
- електромобіль на паливних елементах (англ., Fuel cell electric vehicle (FCEV)).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Діагностика ТЗ є актуальною темою сьогодення, що підтверджується кількістю праць на дану тему. Дослідники Apostolos Giannoulidis, Anastasios Gounaris та Ioannis Constantinou пропонують алгоритм виявлення аномалій технічного стану автомобіля, базуючись на кореляції зібраних сигналів між двома періодами і динамічному створенні еталонних та не аномальних технічних станів. При проведенні експериментів, алгоритм виявився перспективним, показавши точність виявлення аномалій технічного стану у 78% [3]. Інша група дослідників адресує проблему безпеки протоколів збору даних, що базуються на старіших механізмах, які можуть мати певні вразливості. Метод полягає у знаходженні аномальних технічних станів автомобіля, використовуючи приховану марківську модель [4]. Для збору даних з датчиків ТЗ було проведено експеримент з використанням OBD2 сканера на базі мікроконтролера ELM327 [5].

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у представленні підходу до процесу автоматизованого збору інформації з технічного стану транспортного засобу і подальшого аналізу для сповіщення користувача про можливі технічні несправності. Завданням дослідження є розробка концепції дистанційної діагностики технічного стану транспортних засобів в процесі їх експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні автомобілі складаються з багатьох різних комп'ютерних компонентів, які є електронними блоками керування (англ., Electronic Control Units (ECU)). Кожен з таких блоків відповідає за певну функцію [6,7]. Наприклад, блок керування двигуном, контролює різні функції двигуна, такі як, впорскування палива, запалювання, холостий хід, газорозподіл. Для повноцінного функціонування всі ECU з'єднанні в одну мережу для обміну даними, що має назву CAN (англ., Controller Area Network) [7,8].

CAN-bus – це набір із 2 електричних проводів (CAN\_Low і CAN\_High) в мережі автомобіля, де інформація може обмінюватися між ECU [9]. Мережа складається з

набору вузлів, що з'єднані між собою за допомогою CAN-bus. Кожен вузол містить ECU з контролером CAN і трансивером CAN, що відповідають за комунікацію. Загальна схема комунікації ECU зображена на рис. 1.

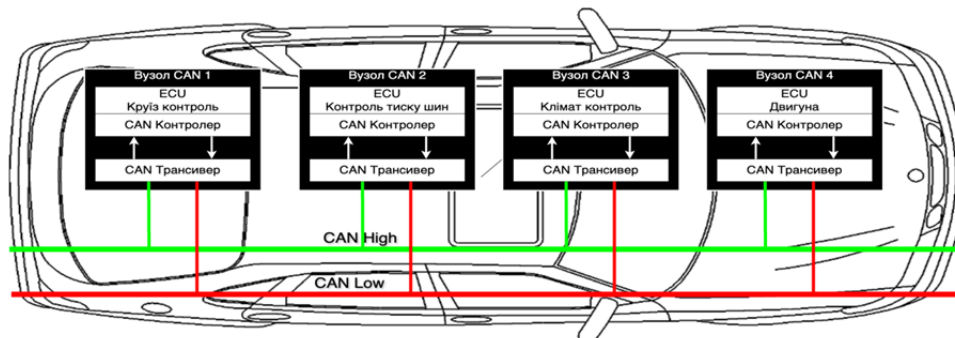


Рисунок 1 – Загальна схема комунікації CAN-мережі

*Джерело: розроблено авторами*

Реалізація CAN-мережі залежить від виробника ТЗ і є закритою імплементацією. Тому, отримання даних напряму з ECU через CAN-мережу є можливим лише, якщо знати протокол комунікації. Для цілей діагностики використовують іншу систему - OBD2 (англ., On-Board Diagnostics).

OBD2 – система самодіагностики технічного стану автомобіля. Система має стандартизований протокол, що не залежить від виробника ТЗ. OBD2 дозволяє отримувати діагностичні коди несправностей та інші дані в реальному часі через спеціальний конектор. Майже усі новітні автомобілі мають підтримку OBD2, що робить цю систему найкращою для діагностики технічного стану будь-якого автомобіля.

OBD2 – стандарт може реалізовуватися у 5 різних способів, які називаються протоколами: ISO 9141-2, KWP 2000-4, SAE J1850 PWM, SAE J1850 VPW, ISO 15765-4. Для підключення до OBD2 використовують J1962 конектор (рис. 2).

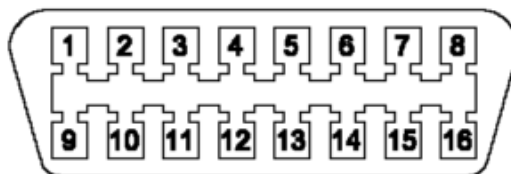


Рисунок 2 – J1962 конектор для підключення до OBD2

*Джерело: на підставі [7]*

Конектор має знаходитись не далі, ніж 1 метр до керма і зазвичай знаходиться від ним. По вигляду конектора можна дізнатися, який протокол імплементований у даному ТЗ. Піни 2 та 10 використовуються у обох J1850 (PWM та VPW) протоколах. Піни 7 та 15 – у протоколах ISO 9141-2 та KWP 2000. Піни 6 та 14 наявні у ISO 15765-4 протоколі. Пін 16 – напруга батареї, а піни 4 та 5 – заземлення. Відповідно, за наявністю тих чи інших пінів можна дізнатися, який протокол використовується для визначення технічного стану ТЗ.

Після під'єднання OBD2, використовуючи доступний протокол, можна розпочинати комунікацію. Повідомлення OBD2 складається з ідентифікатора (CAN ID), довжини даних і безпосередньо самих даних. Дані складаються з режиму, ідентифікатора параметра і масиву байт даних. Режим визначає тип запиту до OBD2. Існує 10 режимів, які визначаються наступними кодами:

1. Код 1 – Прочитати поточні дані (в реальному часі).

2. Код 2 – Отримати збережені дані на момент виникнення кодів несправностей.
3. Код 3 – Зчитування кодів несправностей.
4. Код 4 – Очистка кодів несправностей.
5. Код 5 – Зчитування датчиків кисню.
6. Код 6 – Зчитування останніх результатів діагностики.
7. Код 7 – Зчитування кодів несправностей, що очікують на розгляд.
8. Код 8 – Контроль роботи бортової системи.
9. Код 9 – Запит інформації про транспортний засіб (наприклад, VIN).
10. Код 10 – Постійні коди несправностей.

Для системи дистанційної діагностики технічного стану автомобіля пропонується використовувати OBD2 Bluetooth адаптер для зчитування даних з автомобіля і додаток Android/iOS для отримання даних, виведення їх на екран для користувача і подальшої їх передачі на загальний сервер для аналізу і доступу адміністратора (рис. 3).

Мобільний додаток є ключовим компонентом для передачі даних між OBD2 і сервером. Розробка додатку Android виконується з використанням середовища Android Studio та мови програмування Kotlin/Java. IOS додаток розробляється за допомогою середовища XCode та мови програмування Swift/Objective C. Вимоги до мобільного застосунку:

- періодичне зчитування даних ТЗ та помилок автомобіля;
- вивід помилок ТЗ на екран;
- передача даних і помилок на сервер з використанням мобільної мережі;
- отримання сповіщень про можливі помилки від сервера і нотифікації про них користувача.

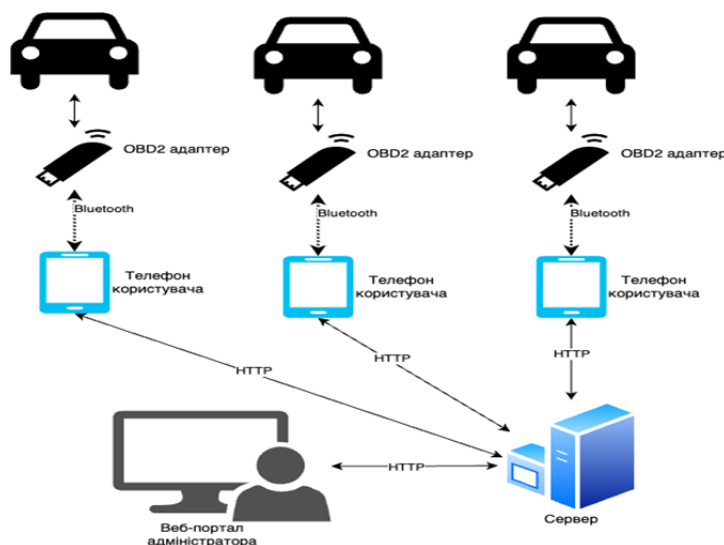


Рисунок 3 – Схема системи дистанційної діагностики технічного стану автомобіля  
Джерело: розроблено авторами

Додаток під'єднується до OBD2 адаптера з використанням Bluetooth. Здійснюється запит до OBD2 на отримання даних, зчитує їх. Далі відбувається запит на отримання кодів помилок і їх зчитування. Усі дані зберігаються в локальній базі даних MySQL. Користувач має можливість моніторити в реальному часі технічний стан автомобіля. Для економії мобільної мережі і зниження витрати енергії запит на оновлення даних OBD2 відправляються кожні 5 хвилин. Даний часовий інтервал має бути достатнім для аналізу справності роботи ТЗ. Усі дані надсилаються на сервер для подальшої їх обробки та аналізу за потреби (рис.4).

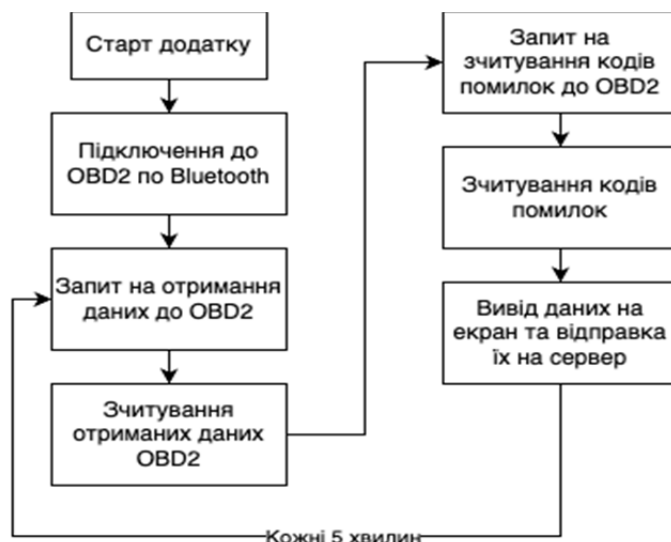


Рисунок 4 – Алгоритм роботи мобільного застосунку

Джерело: розроблено авторами

Сервер виконує роль зберігання даних, отриманих від додатку та їх аналізу. Він містить базу даних SQL для ефективної організації даних. Важливу роль у ефективності моніторингу технічного стану ТЗ відіграє структура організації даних. Для її ефективної побудови потрібно зрозуміти, що саме буде зберігатися і для яких цілей. OBD2 дані можна розділити на 2 категорії – коди помилок та власне дані поточного технічного стану ТЗ (швидкість, частота обертів двигуна, запас пального тощо).

В табл. 1 зображено орієнтовні діагностичні коди помилок (англ., Diagnostic Trouble Code (DTC)).

Таблиця 1 – Список кодів і опис помилок

| Код помилки | Опис помилки                                                   |
|-------------|----------------------------------------------------------------|
| P0198       | Низька температура моторної оливи                              |
| P0199       | Висока температура моторної оливи                              |
| P0220       | Перевищення швидкості двигуна                                  |
| P1189       | Температура моторної оливи поза межами діапазону самоперевірки |
| P1799       | Несправність ланцюга напруги батареї                           |
| B1238       | Помилка перегріву                                              |
| B1342       | ECU несправний                                                 |
| B1352       | Несправність ланцюга ключа запалювання                         |
| B1384       | Несправність ланцюга лампи рівня оливи                         |
| B1483       | Несправність вхідного ланцюга педалі гальма                    |
| B1927       | Несправність бічної подушки безпеки пасажира                   |
| B2472       | Несправність перемикача протитуманних фар                      |
| B2595       | Несправність ланцюга вхідного сигналу захисту від викрадення   |
| C1117       | Несправність вхідного ланцюга обертів                          |
| C1455       | Несправність передньої схеми акселерометра                     |
| C1774       | Температура охолоджуючої рідини поза діапазоном                |
| C1839       | Несправність витоку                                            |
| C1284       | Несправність реле тиску оливи                                  |
| C1267       | Функції ABS тимчасово вимкнено                                 |

Джерело: розроблено авторами на підставі [11]

Повний список помилок доступний за посиланням у списку джерел [11].

Коди помилок використовуються як основне джерело знаходження несправностей ТЗ. Для більш ефективного попередження несправностей необхідно проаналізувати поточний технічний стан автомобіля та його динаміку для знаходження аномалій. Аномалії – це точки даних у наборі даних, які відрізняються від нормального стану існування та суперечать очікуваній поведінці даних. Аномалії визначаються шляхом передбачення наступного стану системи, виходячи з попереднього. Якщо фактичний стан системи відрізняється від передбачуваного, враховуючи статистичну помилку, – то це можна вважати аномалією.

Такі технічні стани ТЗ гарно описують Марківські процеси – стохастичні процеси, в яких тільки поточний стан впливає на майбутні технічні стани. Розглянемо послідовність цих процесів у вигляді подій C1-C8 (рис. 5), які демонструють аномальну витрату палива, аналізуючи швидкість, передачу та власне витрату палива у ТЗ.



Рисунок 5 – Аномальна витрата палива з аналізом швидкості, передачі та власна витрата палива

*Джерело: розроблено авторами*

В початковому технічному стані C1 автомобіль стоїть на місці (швидкість – 0, передача – нейтральна, витрата палива – 0). В стані C2 автомобіль починає набирати швидкість, витрата палива є значною, що не є аномалією для початку руху (швидкість – 5, передача – 1, витрата палива – 20). ТЗ починає поступово збільшувати швидкість до стану C7, де витрата палива стабілізується (швидкість 90, передача 5, витрата палива 8). До цього моменту, ймовірність зміни технічного стану знаходиться в межах норми – автомобіль набирив швидкість. Аномалія відбувається при переході зі стану C7 в стан C8, де швидкість 90 і передача 5 залишаються такими ж, а витрата палива збільшується з 8 до 30. Така зміна є дуже малоймовірною і може свідчити про технічні проблеми ТЗ, які, якщо вчасно не виявити і не усунути, можуть призвести до більших економічних втрат, або ж навіть автомобільної катастрофи.

Перше, з чого потрібно розпочати аналіз даних на виявлення аномалій – це підготовка архітектури сервера. Пропонується визначити компонент, який буде містити логіку визначення специфічної однієї або декількох аномалій – предіктор. Зазначимо, що сервер містить в собі набір предікторів, які відповідальні за надання інформації про певну аномалію. Предіктор (рис. 6), в найпростішому розумінні, – це функція, яка приймає на вхід поточний технічний стан ( $S_c$ ) та новий технічний стан ( $S_e$ ) і повертає ймовірність цього переходу ( $P(S_c, S_e)$ ).

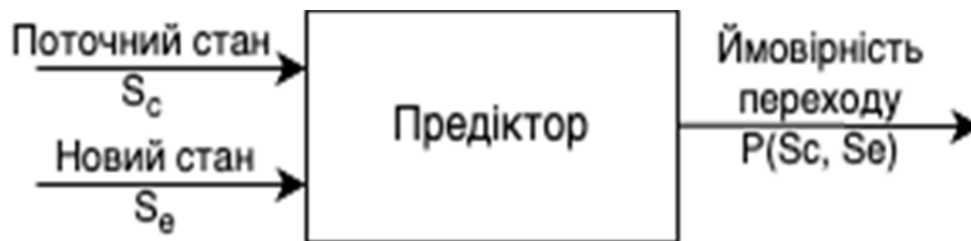


Рисунок 6 – Схема предиктора в наборі з серверу

Джерело: розроблено авторами

Дана архітектура забезпечує можливість легкого розширення і незалежної розробки різних предикторів.

Дуже важливо правильно визначити пороги відхилень технічних станів, при якому відхилення буде вважатися аномалією. Поріг визначається статистикою даних для певної моделі ТЗ. Дані для визначення беруть або шляхом збору даних з автомобіля безпосередньо, або шляхом опрацювання технічних характеристик ТЗ.

Далі застосовуються методи знаходження аномалій. Аномалії класифікують на точкові, контекстуальні та колективні. Для визначення аномалії певного набору даних (екземпляр), йому призначають мітку або оцінку. Методи виявлення аномалій можна класифікувати за кількома підходами – на основі глибини, відстані, щільності, кластеризації, статистики тощо.

Існують різні методи знаходження аномалій: виявлення аномалій на основі найближчої пари; виявлення аномалій на основі реконструкції; виявлення аномалій груп компонентів даних.

Виявлення аномалій на основі реконструкції передбачає розробку моделі за допомогою машинного навчання (англ. Deep Learning), яка тренована на завідомо нормальних даних для того, щоб правильно реконструювати вхідні дані.

Особливість тренування моделі полягає в тому, щоб вхідні дані в модель були рівні вихідним даним. Передбачається, що кінцева модель, натренована на нормальних (не аномальних) даних для вхідного значення  $X$  видасть вихідне значення  $Y$ , таке, що  $X=Y$ . Модель, яка навчена на нормальних даних, при використанні на реальних даних та вхідних аномальних даних, буде видавати значення  $Y$ , яке не буде дорівнювати вхідному значенню  $X$ . Різниця між  $X$  та  $Y$  є помилкою реконструкції (рис. 7).



Рисунок 7 – Блок-схема знаходження аномалій бази даних методом реконструкції

Джерело: розроблено авторами

В цьому алгоритмі помилка реконструкція використовується як оцінка аномалії і створюються сповіщення про аномалію. Вона перевищує певний поріг для кожного вхідного значення  $X_i$  та вихідного значення  $Y_i$ . Приклад реалізації моделі реконструкції наведений в електронному ресурсі [12].

Зазначимо, що виявлення аномалій груп компонентів даних базується на дослідженні не якогось окремого компоненту вхідних даних (наприклад, швидкості), а перевірки і аналізу груп таких компонентів [13]. Наприклад, є вхідні дані, де швидкість ТЗ 100 км/год і двері відкриті. Якщо розглядати ці компоненти окремо, то аномалія відсутня – ТЗ без проблем може їхати зі швидкістю 100 км/год і може мати відкриті двері. Якщо ж їх розглядати, як групу даних – то це виглядає незвично.

Даний метод – це рішення на основі обчислення і порівняння відстані оцінки аномалії в поєднанні зі статистичними тестами для прогнозування несправностей ТЗ. Метод базується на "мудрості натовпу". Для того, щоб виміряти показник відхилення даних ТЗ, вимірюється несхожість зразків за допомогою методів, заснованих на обчисленні відстані (наприклад, виявлення аномалії на основі найближчого сусіда). Така процедура потрібна щоб кількісно визначити аномальність даних по відношенню до нормальних даних цього або іншого ТЗ (рис. 8).

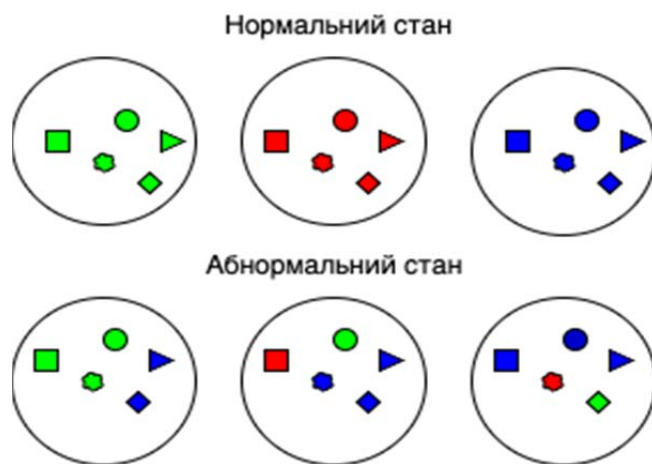


Рисунок 8 – Аномалії груп даних про технічний стан транспортних засобів

*Джерело: розроблено авторами*

Усі методи виявлення аномалій потребують наявності бази тестових даних у нормальному технічному стані. Варто зазначити, що різні ТЗ можуть мати різні норми для того чи іншого показника.

Система дистанційної діагностики має мати можливість сповіщати користувача про виявлені проблеми ТЗ. Для цього пропонується використати протокол MQTT (англ., Message Queue Telemetry Transport)). MQTT протокол – простий і легкий протокол обміну повідомленнями (підписка та публікація), розроблений для пристроїв з обмеженими ресурсами і мереж із високою затримкою, низькою пропускну здатністю або ненадійних мереж. Важливим компонентом протоколу є брокер – програма, яка виконується на комп'ютері (в нашому випадку в хмарі). Брокер відповідає за відправку повідомлень від видавця (англ. publisher), в нашому випадку – сервер, до підписника (англ., subscriber) – в нашому випадку мобільний додаток Android/iOS (рис. 9).

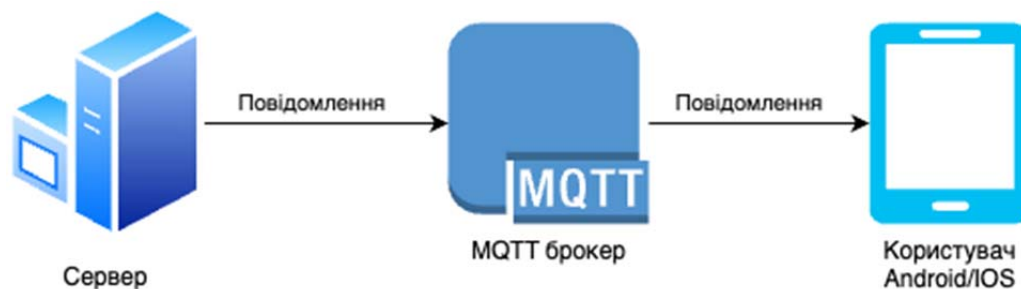


Рисунок 9 – MQTT сповіщення в системі дистанційної діагностики транспортних засобів

Джерело: розроблено авторами

За допомогою цього протоколу сервер має можливість сповістити водія транспортного засобу про знайдені проблеми, які потребують уваги.

Ще одним важливим компонентом системи дистанційної діагностики є портал адміністратора – веб-сайт, який має можливість авторизації з правами адміністратора для перегляду даних про технічний стан ТЗ (пошук по VIN коду) та подальшого їх аналізу і моніторингу. Дані можна поширити з механіком, який надасть консультацію. За допомогою того ж MQTT брокера забезпечується можливість скидання помилок, які виникли через OBD2.

**Висновки:** 1. З'ясовано можливу реалізацію дистанційної діагностики технічного стану транспортних засобів для попередження можливих несправностей шляхом використання мобільних, серверних та веб технологій.

2. Надано аналіз методів виявлення аномалій бази даних про технічний стан транспортних засобів, базуючись на їх поточному технічному стані.

3. Описано підхід автоматичного збору даних про технічний стан з транспортного засобу, використовуючи OBD2.

4. Дивлячись у майбутнє, транспортні засоби стають все більш технологічними і все більше вони мають вбудовану мобільну мережу від виробника. Це відкриває нові можливості у підході до вирішення проблем дистанційної діагностики.

## Список літератури

1. It's 2024, how many cars are there in the world? *WHICHCAR* : веб-сайт. URL: <https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world> (дата звернення 12.10.2024)
2. The different types of engine. *Febiac* : веб-сайт. URL: <https://www.febiac.be/en/article/the-different-types-of-engine> (дата звернення 12.10.2024)
3. Apostolos Giannoulidis, Anastasios Gounaris, Ioannis Constantinou. Exploring unsupervised anomaly detection for vehicle predictive maintenance with partial information. *Proceedings of the 27th International Conference on Extending Database Technology (EDBT)*. 2024.
4. Sandeep Nair Narayanan, Sudip Mittal & Anupam Joshi. *IEEE Workshop on Smart Service Systems*. May 2016.
5. Iskandar, Karto & Tambayong, Alfred & Mulya, Muhammad & Elfanlie, Steven & Herlina, Maria. Mobile-Based Car Diagnostic Application Using Onboard Diagnostic-II Scanner. *ComTech Computer Mathematics and Engineering Applications* 14(2):129-141. 2023. DOI: 10.21512/comtech.v14i2.9138
6. Аулін В.В., Панарін Д.Є. Комплексний підхід в оптимізації та плануванні процесів експлуатації ремонту автомобілів з використанням телеметричних систем дистанційної електронної діагностики. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*. 2014. № 2. С. 29-32.
7. Аулін В.В., Панарін Д.Є. Удосконалення процесу технічного обслуговування автомобілів з використанням методів дистанційної електронної діагностики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 4. С. 88-91.
8. Аулін В.В., Гриньків А.В., Надич Т.М., Яценко В.Ю. Застосуванні засобів дистанційної діагностики для підвищення ефективності технічної експлуатації мобільних машин. *Зб. тез*

- доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» 22-23 лют. 2024 р., м. Київ. - К. : Видавничий центр НУБіП України, 2024. С. 100-103.
9. What is Vehicle CAN bus and why do you need to care. Earth2 digital : веб-сайт. URL: <https://www.earth2.digital/blog/what-is-vehicle-can-bus-ecu-evoque-adam-ali.html> (дата звернення 13.10.2024).
  10. OBD II Protocols Explained. OBD Experts : веб-сайт. URL: <https://www.obdexperts.com/obd-ii-protocols-explained/> (дата звернення 13.10.2024)
  11. OBD2 Trouble Codes. OBD Codes : веб-сайт. URL: [https://www.obd-codes.com/trouble\\_codes/](https://www.obd-codes.com/trouble_codes/) (дата звернення 13.10.2024).
  12. Reconstruction based anomaly detection with Autoencoder. Github : веб-сайт. URL: <https://github.com/Zinwaiyan274/Reconstruction-based-anomaly-detection-with-Autoencoder> (дата звернення 15.10.2024).
  13. Chalapathy, Raghavendra & Toth, Edward & Chawla, Sanjay. Group Anomaly Detection Using Deep Generative Models: Recognizing Outstanding Ph.D. Research. *Energy Transfer Processes in Polynuclear Lanthanide Complexes (pp.173-189)*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-10925-7\_11.

## References

1. It's 2024, how many cars are there in the world? *WHICH CAR* : веб-сайт. URL: <https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world> (date of application 12.10.2024) [in English].
2. The different types of engine. Febiac : веб-сайт. URL: <https://www.febiac.be/en/article/the-different-types-of-engine> (date of application 12.10.2024) [in English].
3. Apostolos Giannoulidis, Anastasios Gounaris, Ioannis Constantinou. Exploring unsupervised anomaly detection for vehicle predictive maintenance with partial information. *Proceedings of the 27th International Conference on Extending Database Technology (EDBT)*. 2024. [in English].
4. Sandeep Nair Narayanan, Sudip Mittal & Anupam Joshi. *IEEE Workshop on Smart Service Systems*. May 2016. [in English].
5. Iskandar, Karto & Tambayong, Alfred & Mulya, Muhammad & Elfanlie, Steven & Herlina, Maria. Mobile-Based Car Diagnostic Application Using Onboard Diagnostic-II Scanner. *ComTech Computer Mathematics and Engineering Applications 14(2)*:P 129-141. 2023. DOI: 10.21512/comtech.v14i2.9138 [in English].
6. Aulin V.V., & Panarin D.Ie. (2014). Kompleksnyi pidkhid v optymizatsii ta planuvanni protsesiv ekspluatatsii remontu avtomobiliv z vykorystanniam telemetrychnykh system dystantsiinoi elektronnoi diahnostryky [A comprehensive approach in optimizing and planning the operation processes of car repair using telemetry systems of remote electronic diagnostics]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya : Tekhnichni nauky - Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical sciences*. № 2. P. 29-32 [in Ukrainian].
7. Aulin V.V., & Panarin D.Ie. (2014). Udoskonalennia protsesu tekhnichnoho obsluhovuvannia avtomobiliv z vykorystanniam metodiv dystantsiinoi elektronnoi diahnostryky [Improving the process of car maintenance using methods of remote electronic diagnostics]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu - Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. № 4. P. 88-91 [in Ukrainian].
8. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Nadych T.M., & Yatsenko V.Iu. (2024). Zastosuvanni zasobiv dystantsiinoi diahnostryky dlia pidvyshchennia efektyvnosti tekhnichnoi ekspluatatsii mobilnykh mashyn [Application of remote diagnostics to improve the efficiency of technical operation of mobile machines]. *Zb. tez dopovidei II Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Kramarovski chytannia» - Coll. Abstracts of reports of the 11th International Scientific and Technical Conference "Kramor's Readings"*. 22-23 liut. 2024 r., m. Kyiv. - K. : Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy. P. 100-103 [in Ukrainian].
9. What is Vehicle CAN bus and why do you need to care. Earth2 digital : веб-сайт. URL: <https://www.earth2.digital/blog/what-is-vehicle-can-bus-ecu-evoque-adam-ali.html> (date of application 13.10.2024) [in English].
10. OBD II Protocols Explained. OBD Experts : веб-сайт. URL: <https://www.obdexperts.com/obd-ii-protocols-explained/> (date of application 13.10.2024) [in English].
11. OBD2 Trouble Codes. OBD Codes : веб-сайт. URL: [https://www.obd-codes.com/trouble\\_codes/](https://www.obd-codes.com/trouble_codes/) (date of application 13.10.2024).
12. Reconstruction based anomaly detection with Autoencoder. Github : веб-сайт. URL: <https://github.com/Zinwaiyan274/Reconstruction-based-anomaly-detection-with-Autoencoder> (date of application 15.10.2024) [in English].
13. Chalapathy, Raghavendra & Toth, Edward & Chawla, Sanjay. Group Anomaly Detection Using Deep

Generative Models: Recognizing Outstanding Ph.D. Research. *Energy Transfer Processes in Polynuclear Lanthanide Complexes* (pp.173-189). 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-10925-7\_11 [in English].

**Oleg Liashuk**, Prof., DSc, **Volodymyr Hotovych**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vitalii Bonar**, Post-graduate  
*Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine*

**Viktor Aulin**, Prof., DSc, **Andrey Hrinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Liubomyr Matiichuk**, Assoc. Prof., Dr. econ. sci.

*Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine*

## **The Concept of Remote Diagnostics of the Technical Condition of Vehicles During their Operation**

The technical condition of the vehicle directly affects the safety of people. With the increase in the number of cars, this problem becomes even more relevant. Today, checking the condition of the vehicle mostly takes place in the physical presence of a mechanic who reads data from the car's sensors with the help of scanners. The possibility of automating this process and providing the ability of remote access to data would significantly reduce the cost and speed up the detection of malfunctions.

This paper shows a concept of approach to the remote real time vehicle diagnostics. Data collection is possible using OBD2 protocol that allows performing a real time communication with vehicle ECUs. Even though a vehicle diagnostic system already has diagnostic trouble codes (DTCs) on its own they don't necessarily catch all the edge cases when malfunctions occur. For this purpose we suggest using all available vehicle signals to then analyze and find potential anomalies using different methods for anomaly detection. Reconstruction-based anomaly detection includes training a model using a known normal (healthy) data to then recreate input data. Group based anomaly detection implies analyzing a group of different signals instead of analyzing them separately. Detected anomalies are then saved to a database on a remote server where users can always check them using a web page or a mobile application.

The proposed concept provides a modern approach to detect vehicle malfunctions. Even though car vendors don't always follow the same standards, the future of vehicle diagnostics is looking bright. Most of the modern cars especially in the luxury segment are equipped with a sim card. This opens a window of other approaches to remote vehicle diagnostics where the scanner is not needed anymore. Vendors can have a custom OEM backend that receives all vehicle signals directly from a car.

**vehicle, remote diagnostics, technical condition, OBD2 self-diagnosis, error code, anomaly, in the data set**

*Одержано (Received) 01.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.09.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 293.3.01

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.40-45](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.40-45)

Л.А. Тарандушка, проф., д-р. техн. наук, В.С. Ковтуненко, доц., канд. фіз.-мат. наук  
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна  
e-mail: tarandushkal@ukr.net; kovtvics@ukr.net

## Дослідження структури матеріалів, що утворюються за випаровування у вакуумі скла системи миш'як-селен для подальшого використання в автомобільній галузі

Досліджено хімічний склад тонкоплівкових матеріалів, що напилювалися на змінні підкладки за умов термічного випаровування скла миш'як-селен різних модифікацій.

Виявили що за використання ефузійного випаровувача структура пару скла, що включає менше 42 атомних % миш'яку, з часом збагачується As, скло з більшим вмістом збагачується селеном. Нерівномірний характер випаровування пояснюється відмінностями атомної будови стеклок та їхніх розплавів.

**аморфні плівки, імпульсне термічне напилення, просте термічне напилення, хімічний склад, ФРРА, халькогеніди, конденсат, випаровувач, інтерференція, рентгеноспектральний мікроаналіз**

**Постановка проблеми.** Термічне випаровування у вакуумі найчастіше застосовують, щоб виготовити плівки скла халькогенідів, оскільки цей спосіб виготовлення плівкових структур та плівкового покриття вдало поєднує в собі простоту застосування та економічність. Але цей метод не застосований для напилення плівок, коли термічне випаровування відбувається нерівномірно, тому що за таких умов відбувається зміна співвідношення складу фази [1] з часом, що спричиняє відмінності хімічних складів початкового скла і готової плівки або отримання конденсатів з нерівномірним розподілом концентрації хімічних елементів за товщиною шару.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даному етапі найінтенсивніше вивчаються два типи аморфного стану халькогенідів: стекла та аморфні плівки.

Поряд з цим аформфні плівки мають більший ступінь нерівноважності, ніж такі ж масивні стекла [1-4]. Такий стан пояснюється з варіаціями утворення їх локальної будови, де неповна хімічна організованість поєднується із сильнішою молекулярною гетерогенністю в нано-масштабі. Таке некристалічне середовище розглядається як впорядкування з надлишковою ентропією. Надвеликим ступенем нерівноважності описуються свіжонапилені у вакуумі аморфні плівки. В післяконденсаційний час вони зазнають значних релаксаційних структурних змін, найінтенсивніші із них несуть поліеризаційні особливості. Нерівноважні релаксаційні зміни виражаються у стані пов'язаних перетворень окремих областей структури і ведуть систему до мінімального значення повноівільної енергії [5, 6]. В той же час, поступове проходження проміжних нестабільних етапів веде систему до зменшення початкових внутрішніх механічних напружень. Аморфні плівки, що ми досліджуємо під впливом таких незворотніх змін точкової структури, отримують зміни параметрів мікротвердості, ньютонівської в'язкості, фото чутливості, розчинності в хімічних розчинниках, швидкості деформації під впливом навантаження [7, 8].

Тому дослідження характеру таких змін структурно-чутливих властивостей термічно напілених структур на основі AsSe важливе з метою створення розробок в оптоелектроніці, інтегральній оптиці та нанотехнологіях.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження термічного випаровування сплавів скла системи миш'як-селен та знаходження технологічних способів виготовлення плівок цієї системи із повторюваним стабільним хімічним складом.

**Виклад основного матеріалу.** Відштовхуючись від гіпотези, що середній склад плівки відповідає середньому складу пари над випаровувачем при осіданні компонентів і на ефекти відбивання від підкладки різних компонентів можна не зважати, вивчати випаровування скла і зміни складу конденсатів аналізуючи їх хімічний склад. Напилення досліджували поетапно. При переході від одного кроку до іншого міняли підкладку за товщини плівки близько  $(1,25-1,45) \cdot 10^{-6}$  м. Конденсація відбувалась до повного випаровування матеріалу. До кінця кожного етапу отримували 5-7 зразків; їхній хімічний склад відповідав середньому складу пари над випаровувачем на кожному кроці випаровування.

Експериментально Установа ВУП-4 використовувалась для виготовлення плівкових шарів методами простого термічного та переривистого випаровування. Танталовий ефузійний випаровувач використовували для простого термічного випаровування. Швидкість напилення встановлювали близько  $7,8 \cdot 10^{-9}$  м/с за вакууму 5,6 мПа. Товщина при конденсації вимірювалась інтерференційним методом на відбиття за довжиною хвилі 1,16 мкм випромінювання лазера ЛГ-126. Дрібна фракція скла рівномірно подавалась у випаровувач відкритого типу із ніобію за імпульсивного випаровування. За імпульсивного випаровування середня швидкість осадження була  $4,8 \cdot 10^{-9}$  м/с. Підкладками були свіжі зломи (001) монокристалів NaCl за кімнатної температури.

Методом рентгеноспектрального мікроаналізу на електронному мікроскопі ЕММА-4 у режимі хвильової дисперсії вимірювали склад виготовлених плівок. Лінійна залежність інтенсивності зареєстрованої полоси хімічного елемента від його концентрації в речовині була основою для кількісного рентгеноспектрального мікроаналізу [2]. Процентний склад миш'яку та селену в зразках плівки розраховували за формулами:

$$\frac{I(As)}{I(Se)} = C(As-Se) \frac{K(As)}{K(Se)}, \quad K(As) + K(Se) = 100\%,$$

тут  $K$  – концентрація відповідного елемента;

$I$  – інтенсивність аналітичної полоси елемента;

$C$  – коефіцієнт пропорційності, що визначався із дослідження еталонних зразків елементарного миш'яку (18-2), та селену (21-3):

$$C(As-Se) = \frac{I(As)}{I(Se)}.$$

Ми отримали  $C(As-Se) = 1,36$ .

Оскільки вимірювання інтенсивності аналітичних ліній відбувалось одночасно від одної і тої ж частини зразка, то виконувалась і вимога однакових умов збудження. Відмінності ступеня поглинання зразком випромінювання від атомів миш'яку та селену не враховувалась через майже однакові довжини хвиль цих випромінювань.

Таблиця 1 –

| Дані для AsSe                     |                                       | Метод напилення |                |                               |                     |                               |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Хімічний склад початкового скла   |                                       | просте          |                |                               | середній            | імпульсне                     |
| зразок шихти для синтезу          | рентгено-спектральний аналіз          | номер плівки    | товщина плівки | Вміст миш'яку в плівці, ат, % | Вміст миш'яку ат, % | Вміст миш'яку в плівці, ат, % |
| As <sub>11</sub> Se <sub>89</sub> | As <sub>11</sub> Se <sub>89</sub>     | 1               | 1.48           | 5.1                           | 11.4                | 11.3                          |
|                                   |                                       | 2               | 1.47           | 4.8                           |                     |                               |
|                                   |                                       | 3               | 1.48           | 6.1                           |                     |                               |
|                                   |                                       | 4               | 1.43           | 11.3                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 5               | 1.56           | 21.3                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 6               | 0.78           | 26.9                          |                     |                               |
| As <sub>19</sub> Se <sub>81</sub> | As <sub>19</sub> Se <sub>81</sub>     | 1               | 1.35           | 15.9                          | 21.3                | 21.1                          |
|                                   |                                       | 2               | 1.34           | 18.1                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 3               | 1.29           | 21.1                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 4               | 1.42           | 22.9                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 5               | 2.84           | 27.3                          |                     |                               |
| As <sub>29</sub> Se <sub>71</sub> | As <sub>29</sub> Se <sub>71</sub>     | 1               | 1.34           | 29.1                          | 31.7                | 31.5                          |
|                                   |                                       | 2               | 1.39           | 31.4                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 3               | 1.41           | 31.4                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 4               | 1.40           | 31.1                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 5               | 1.32           | 31.9                          |                     |                               |
| As <sub>41</sub> Se <sub>59</sub> | As <sub>39,5</sub> Se <sub>60,5</sub> | 1               | 1.37           | 38.3                          | 37.8                | 38.1                          |
|                                   |                                       | 2               | 1.33           | 38.5                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 3               | 1.38           | 37.6                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 4               | 1.35           | 38.4                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 5               | 1.16           | 41.1                          |                     |                               |
| As <sub>49</sub> Se <sub>51</sub> | As <sub>47,5</sub> Se <sub>52,9</sub> | 1               | 1.31           | 48.9                          | 47.1                | 46.9                          |
|                                   |                                       | 2               | 1.29           | 46.8                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 3               | 1.27           | 43.9                          |                     |                               |
|                                   |                                       | 4               | 0.92           | 44.1                          |                     |                               |

Джерело: розроблено авторами

В таблиці наведені дані вивчення склоподібних монолітних та аморфних плівкових зразків системи миш'як-селен. Статистична похибка дослідження хімічного складу виявилася  $\pm 1,2$  ат % за довірчої ймовірності  $\alpha=0,96$ . Систематична похибка 0,6-2,1 ат % в межах складу системи  $\geq 31$  ат % спричинена нехтуванням похибкою на поглинання.

При напиленні плівок відбувається процес перевипаровування різних складових пари із підкладки, що впливає на відповідність середнього складу осажденного матеріалу середньому складу конденсованої парової фази. Тому при вивченні випаровування скла потрібно враховувати ці механізми, співставляючи склад плівок, що виготовлялись різними методами із складом початкового скла, підтвердили початкову гіпотезу про перевипаровування. За простого напилення компоненти пари значно варіюють під час напилення шару шару плівки. Вплив перевипаровування обумовлений різною швидкістю зміни складу нанесеного шару та паровим потоком.

Щоб оцінити вплив цих факторів обчислювали усереднені кількості As  $n$  в тонкоплівковому покритті, ще отримані за один етап монотермічного випаровування скла певного складу:

$$n = \frac{\sum l_i n_i}{\sum l_i},$$

де  $i$  – номер плівки;

$l_i$  – товщина плівки;

$n_i$  – вміст миш'яку в  $i$ -му покритті. На етапах наших досліджень, як показують розраховані результати  $n$  та кількість миш'яку в монозразках, ефект післявипаровування складових пари з підкладки на кореляцію між середніми компонентами в плівці і парю, що її формує, незначний.

Моновипаровування скла системи миш'як-селен, крім  $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$ , протікає нерівномірно, поступово зростаючи, якщо склад плівки відхиляється від  $n = 39$  ат %. Скло, що містить менше 39 ат % миш'яку, має вміст пару над випаровувачем, що збагачується на As. Скло, що має  $n > 400$ , – збагачується на Se [3]. Такі ефекти в процесах термовипаровування можна пояснити фрагментарним характером структури аморфних As та Se, оскільки тиск пари над миш'яком та селеном більший, в порівнянні із  $\text{As}_2\text{Se}_3$ .

Вивчення функції радіального розподілу атомів (ФРПА) [4, 5] дозволяє стверджувати про подібність структури розплавів та стекол.

Скло із вмістом миш'яку 39 ат % описується структурою, де окремі одиниці  $\text{AsSe}_{1,5}$  пов'язані атомами селену, що у свою чергу мають два зв'язки з атомами миш'яку [6]. Якщо збільшувати вміст миш'яку ( $n > 39$  ат %), то спектри комбінаційного розсіювання (КР) скла збагачуються тими ж лініями за 201 та 156  $\text{см}^{-1}$ , що є і в спектрах аморфного As [7]. Відбувається зміна просторового зв'язку для певних атомів миш'яку, що зумовлює появу локальних просторових структурних утворень, як і в аморфній структурі, що поєднуються у склі атомами селену. Зміна просторового порядку складу пари над розчинами скла для  $n > 39$  ат % у бік збільшення As пояснюється збільшенням тиску пари над миш'яком порівняно з  $\text{As}_2\text{Se}_3$ .

Нерівномірність термовипаровування пояснюється переважанням As і структура розплаву, і структура пари зміщується в бік зменшення вмісту миш'яку.

Дані по вивченню структури розплаву  $\text{As}_{49}\text{Se}_{51}$  [4] також співпадають із наведеними вище висновками. Функції радіального розподілу атомів скла системи миш'як-селен тако складу на межі зміни фаз змінюється в бік співпадіння з функціями розподілу розплаву  $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$ .

З цього робимо висновок про термічну нестабільність системи  $\text{As}_{49}\text{Se}_{51}$  в рідкій фазі. Більш за все структуру розплаву формують кластери атомів такі ж, як і в системі  $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$ , та в аморфному миш'яку. Про нерівномірний процес плавлення кристалічного  $\text{As}_4\text{Se}_4$  свідчать також і дані із інших джерел [7, 8]. Утворення кристалічної фази  $\text{As}_3\text{Se}_4$  характерно для  $\text{As}_5\text{Se}_5$  для рівноважних умов за температури 538 К.

Наявність кластерів, притаманних аморфному Se, спричиняє нерівномірний спосіб утворення парової фази скла, в якій  $n < 39$ . Рівномірне розміщення кластерних частинок  $\text{AsSe}_{100-n}$  для інтервалу  $n \leq 36$  ат %, як показують молекулярні спектри [7]. До кластерів, що утворені із комбінації окремих частинок миш'як-селен (1,5) додаються довші ланцюжки селену. Можна змодельовати ті ж самі процеси і для розчинів миш'як( $n$ )-селен(100- $n$ ) в інтервалі 9 ат %  $\leq n \leq 39$  ат %. Як показує таке моделювання селен в такому інтервалі концентрації легко випаровується, тому для цієї області характерним є нерівномірний спосіб напilenня, а градієнт компонентів розчину та

пари під час нанесення направлений у бік зменшення вмісту селену. Аморфному Se притаманний більший об'єм окремих кластерів, що спричиняє збільшення нерівномірності випаровування скла для градієнтів  $n < 39$  ат %.

**Висновки.** Структурно-однорідні матеріали системи миш'як( $n$ )-селен( $100-n$ ) із елементним набором, що стабільно повторюється, за допомогою простого термовипаровування вдається отримати лише за  $n \approx 39$  ат %. Якщо не дотримуватися цієї умови, то наноситься плівка із зміною компонентного складу по ширині плівки. Для уникнення такої зміни концентрації потрібно змінювати концентрацію наважки, не усю її частину випаровувати, та поєднувати при нанесенні плівки з методом імпульсного термічного випаровування.

## Список літератури

1. K. White., B. Kumar., K.Rai Amarendra, Effect of deposition rate on structure and properties of  $As_2S_3$  films, *Thin Solid Films*. 1988. Vol. 161. 139.
2. Дутчак Я.І. Рентгенографія рідких металів. Львів : Вища школа. 1977. 161 с.
3. D. Ralf Steudel. Properties of Sulfur-Sulfur Bonds . *Angewandte Chemie International Edition*. 14, No. 10, 655 (1975).
4. В.С. Ковтуненко. Структура дво- та триатомових кластерів парової фази матеріалів системи As–S . *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: зб. наук. пр.* К.: РВВ ІМФ, 2016. Т. 14, № 2. С. 221-234.
5. В.П. Захаров, В.С. Герасименко. Структурні особливості напівпровідників в аморфному стані : монографія . Академія наук Української РСР, Інститут проблем матеріалознавства. Київ: Наукова думка. 1976.
6. А.А. Попеску, В.Т. Долгер, І.І. Ватаман, А.І. Буздуган, К.М. ґндричан. Молекулярний паровий аналіз тонких аморфних плівок  $As_xS_{100-x}$ : склоподібні напівпровідники для оптоелектроніки . *Ed. House "Shtynyt'sa"*, Chisinau. 1997 . P. 98-107
7. Chern G.C., Zauks J., McGhie A.R. Spin-coated amorphous chalcogenide films: thermal properties. *J. Applied Physics*. 1983. Vol. 54. № 8. P. 4596-4601.
8. Martin T.P. Arsenic sulfide clusters. *Solid state communications*, 1983. V.47, №2. P.111-114.
9. Popescu A. Structure modelling of chalcogenide vitreous films by computational chemistry program. *Moldavian Journal of the Physical Sciences*. № 2. 2002. P. 130-138.
10. Іваницький В.П. Механізми формування стохастичнонеоднорідної структури аморфних халькогенідів систем AIV-BV-XVI: автореф. дис... д-ра фіз.-мат. наук: 01.04.07 . X. 2008. 34 с.

## References

1. K. White., B. Kumar., & K.Rai Amarendra, (1988) Effect of deposition rate on structure and properties of  $As_2S_3$  films, *Thin Solid Films*. 161, 139 [in USA].
2. Ya.I. Dutchak. (1977). Renthenografia ridkyh metaliv. Vyscha shkola, Lviv. [in Ukrainian].
3. D. Ralf Steudel. (1975) Properties of Sulfur-Sulfur Bonds // *Angewandte Chemie International Edition*. 14, No. 10, 655. [in German].
4. V.S. Kovtunencko. (2016) Struktura dvo- ta tryatomovykh klasteriv parovoyi fazy materialiv systemy As–S [The structure of diatomic and triatomic clusters of the vapor phase of the materials of the system As–S] // *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotechnologiji: zb. nauk. pr.* K.: RVV IMF. T. 14, № 2. P. 221-234. [in Ukrainian].
5. Zakharov, V.P., & Gerasimenko, V.S. (1976). Structurnije osobennosti poluprovodnikov v amorphnom sostojanii. *Akademiya nauk Ukrayins'koyi RSR, Instytut problem materialoznavstva..* Kiyv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
6. Popescu, A.A., Dolhyer, V.T., Vataman, I.I., Buzdugan, A.I., & Yndrychan, K.M. (1997). Molekuljarnij phazovij analiz tonkich plenok amorphnich  $As_xS_{100-x}$ : Stekloobraznije poluprovodniki dlja optoelektroniki . *Ed. House "Shtynyt'sa"*, Chisinau. P. 98-107 [in Moldavia].
7. Chern, G.C., Zauks, J. & McGhie A.R. (1983). Spin-coated amorphous chalcogenide films: thermal properties. *J. Applied Physics*. V. 54. №8. P. 4596-4601. [in Ukrainian].
8. Martin, T.P. (1983). Arsenic sulfide clusters. *Solid state communications*. V.47, № 2. P.111-114. [in Belgium].
9. Popescu, A. (2002). Structure modelling of chalcogenide vitreous films by computational chemistry

- program. *Moldavian J. of physical sciences*. 2002 №2. P. 130-138. [in Moldova].
10. Ivanytskyi, V.P. (2008). *Mekhanizmy formuvannia stokhastychno neodnorodnoi struktury amorfnykh khal'kohenidiv* [Mechanisms of stochastically heterogeneous structure formation of amorphous chalcogenides]. Extended abstract of Doctor's thesis [in Ukrainian].

**Liudmyla Tarandushka**, Prof., DSc, **Victor Kovtunenکو**, Assoc. Prof., PhD phys.-math. sci.  
*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

### **Study of Structure of Materials Which are Formed by Evaporation off Glass Arsenic-Selenium System for Further Use in the Automotive Industry**

Thin films Ar-Se system are widely used in optoelectronics, in the production of microchips, therefore they are actively used in modern automotive production. Improvement of methods of obtaining films with a renewable composition is an urgent problem.

The chemical composition of amorphous films sputter on changeable substrates at the thermal evaporation of arsenic(n)-selenium(100-n) glasses has been investigated and has been analyzed.

It was received that at the stage of glass evaporation in the interval less than 39 at % of arsenic the modifications of vapor phase over substrates changes for a time and it reaches by arsenic.

For glasses with  $n > 39$  at % the modifications enriches by selenium. These results have been analyzed where the uneven character of application is connecting with the features of the chemical structure of arsenic(n)-selenium(n-k) glasses and their melts.

**amorphous films, pulsed thermal sputtering, simple thermal sputtering, chemical composition, FRPA, chalcogenides, condensate, evaporator, interference, X-ray spectral microanalysis**

*Одержано (Received) 07.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.2; 615.831

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.46-59](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.46-59)

**В.В. Щепін**, студ., **Д.В. Трушаков**, доц., канд. техн. наук, **Н.П. Сисоліна**, доц., канд. екон. наук, **М.О. Федотова**, канд. техн. наук, **О.А. Козловський**, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Телюта**, доц., канд. техн. наук

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

*e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com*

### Розробка додатку на смартфон для керування пристроєм для покращення психоемоційного стану людини та дослідження економічної ефективності функціонування розробленого пристрою

Статтю присвячено результатам розробки додатку на смартфон для керування розробленого електронного пристрою, що випромінює різнокольорові світлові ефекти для покращення психоемоційного стану людини. В результаті проведеного аналізу існуючих пристроїв нами було запропоновано та виготовлено діючий макет електронного приладу, що випромінює різнокольорові світлові ефекти, а також вимірює основні параметри навколишнього середовища - температуру, вологість та атмосферний тиск. Цей пристрій також здатний за даними вимірювань температури та вологості навколишнього середовища у приміщенні, керувати пристроями зміни мікроклімату в середині приміщення – кондиціонером та зволожувачем повітря. Також розроблено власний додаток на смартфон для дистанційного керування приладом для покращення психоемоційного стану людини. Було проведено дослідження ефективності функціонування розробленого пристрою. Виконано розрахунок економічної ефективності впровадження у виробництво та медзаклади.

**електронний пристрій, мікроконтролер, різнокольорові світлові ефекти, психоемоційний стан людини, додаток для смартфона, ефективність функціонування**

**Постановка проблеми.** В теперішній час усе більше людей скаржиться на депресію, втому, та погіршення психоемоційного стану в цілому [1]. Особливо це відчувається в Україні – із-за російської агресії у всіх людей в Україні з'явилося почуття тривоги, стрес, роздратованість, депресія.

Для відновлення психоемоційного стану людини існує два основні підходи: медикаментозна терапія та фізіотерапія.

Медикаментозна терапія є основним лікувальним засобом, однак має ряд побічних ефектів. Однак є певна кількість людей, які не бажають приймати лікарські препарати. З розвитком методів фізіотерапії стало можливим за допомогою різних медичних пристроїв відтворювати фізичні фактори апаратними засобами, які використовуються з лікувальною метою.

Вченим вдалося з'ясувати, що кожний відтінок кольору викликає різну активізацію мозку людини [3]. Також відомо, як кольори впливають на психофізіологічний стан людини.

Нами було розроблено та створено діючий макет пристрою для покращення психоемоційного стану людини [4]. Робота пристрою полягає у випромінюванні світлових потоків різного кольору та інтенсивності, що впливають на біоритми головного мозку людини. Таким чином, спостерігаючи за цими світловими потоками у людини може відбутися покращення психоемоційного стану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За даною тематикою нами було проведено ряд досліджень.

У роботі [4], нами було представлено блок схему першого електронного блоку для створення різнокольорових світлових ефектів, а також блок схему другого електронного блоку пристрою для керування побутовими пристроями зміни мікроклімату в середині приміщення. Крім того наведено структурну схему та алгоритм роботи пристрою.

У роботі [5] описано вирішення завдання розширення функціональних можливостей пристрою для корекції психоемоційного стану, а саме автоматизація процесу вмикання та вимикання кондиціонера та зволожувача повітря у задані інтервали часу протягом доби для створення більш комфортних умов навколишнього середовища у приміщенні та покращення психоемоційного стану людини.

У роботі [6] наведено доцільність використання пристрою для покращення психоемоційного стану водіїв транспортних підприємств. Даний пристрій запропоновано встановити в кабіні транспортного засобу. Під час стоянки водій може їм користуватися - покращити власний психоемоційний стан.

**Метою даного проекту** є розробка простого та зручного власного додатку для смартфона, щоб можливо було дистанційно керування роботою пристрою покращення психоемоційного стану людини. Крім того необхідно дослідити ефективність функціонування розробленого пристрою.

**Постановка завдання.** Розробити додаток на смартфон для керування пристроєм. Дослідити ефективність функціонування розробленого пристрою для корекції психоемоційного стану людини. Розрахувати собівартість пристрою та визначити точки беззбитковості для підприємства, що буде виробляти прилад. Визначити собівартість медичної послуги та доцільність впровадження приладу в медичному кабінеті фізіопроцедур.

**Виклад основного матеріалу.** Загальна блок-схема пристрою для корекції психоемоційного стану людини представлена на рис. 1. Схема містить два функціональні електронні блоки. Перший електронний блок пристрою призначений для створення різнокольорових світлових ефектів, а також він вимірює і відображає на дисплеї основні параметри мікроклімату (температуру, вологість і атмосферний тиск). Другий електронний блок пристрою застосовано для управління побутовими приладами – зволожувачем повітря та кондиціонером. Пристрій працює наступним чином. В першому електронному блоці пристрою датчик вимірювання параметрів мікроклімату BME280 (вимірювач температури, вологості та атмосферного тиску) та датчик реального часу ds3231 підключені до мікроконтролера atmega328 (Arduino NANO), який обробляє отримані дані з них та виводить отриману інформацію на LCD дисплей 2004 i2c. Також виміряні параметри мікроклімату відправляються з допомогою bluetooth модулю hc-06 у другий електронний блок. Модуль SP110E керує адресною світлодіодною стрічкою WS2812b. Керування різними кольорами та світловими ефектами стрічки, здійснюється по bluetooth за допомогою додатку на смартфоні. В другому електронному блоці сигнал, що містить інформацію про температуру та вологість надходить з bluetooth hc-06 модулю першого блоку на модуль bluetooth hc-06 другого блоку до мікроконтролера atmega328, який керує п

канальним реле. У мікроконтролері інформація про температуру та вологість опрацьовується по закладеному алгоритму на основі якого приймається рішення щодо вмикання або вимикання окремого реле, яке керує роботою під'єднаних до нього пристроїв зміни мікроклімату в середині приміщення – кондиціонеру, зволожувачу повітря.[4,10]

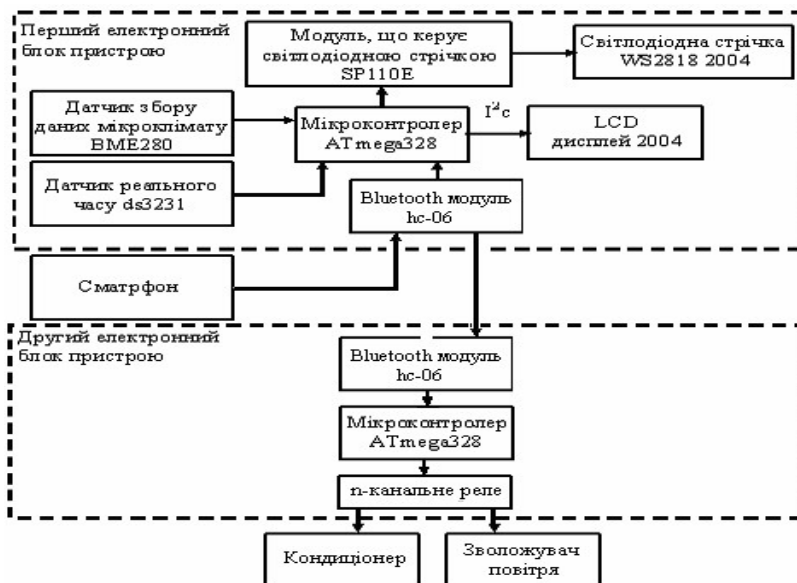


Рисунок 1 – Загальна блок-схема пристрою для корекції психоемоційного стану людини

Джерело: розроблено авторами

Нами запропоновано власний простий та зручний додаток для смартфона, щоб було можливо зручно дистанційно керувати пристроєм по bluetooth. Його основне призначення - перевірити стан Bluetooth пристрою. Якщо bluetooth вимкнено, він перенаправляє користувача до Bluetooth Check Screen Activity. Для цього він використовує Broadcast Receiver для відстеження змін у статусі Bluetooth.

Методи - під час створення (збережений стан екземпляра: пакет?): метод, який викликається під час створення активності. Тут ініціалізується та перевіряється статус Bluetooth пристрою. Якщо Bluetooth вимкнено, користувач перенаправляється до екрана перевірки Bluetooth.

Поля:

- Bluetooth Receiver: об'єкт Broadcast Receiver, який використовується для моніторингу змін у статусі Bluetooth і перенаправлення користувача, якщо Bluetooth вимкнено;

- Bluetooth CheckScreenActivity – це дія, яка сповіщає користувача, коли Bluetooth вимкнено.

Опис:

- визначте компонент: відображається повідомлення про те, що вам потрібно увімкнути Bluetooth;

- інтерфейс: простий екран із текстом і, можливо, кнопка для ввімкнення Bluetooth;

- функціональність: відображає повідомлення про ввімкнення Bluetooth і надає користувачам можливість увімкнути Bluetooth.

Важливі методи:

- під час створення (збережений стан екземпляра: пакет?): метод, який викликається під час створення активності, ініціалізується інтерфейс;

Взаємодія між Main Activity і Bluetooth Check Screen Activity:

- MainActivity виявляє, що Bluetooth вимкнено, і автоматично перенаправляє користувача до Bluetooth Check Screen Activity.

Зображення підключення пристрою по представлено на рис.2.



Рисунок 2 – Дизайн підключення пристрою по Bluetooth

*Джерело: розроблено авторами*

Активність екрана вибору – це діяльність, призначена для вибору пристрою Bluetooth для подальшого керування. Ця дія надає користувачеві список спарених пристроїв Bluetooth для вибору. Користувач може вибрати пристрій зі списку та перейти до керування ним.

Ключові компоненти:

- менеджер Bluetooth і адаптер Bluetooth: використовуються для доступу до систем обслуговування Bluetooth.

- дозвіл Bluetooth: перевіряє, чи дозволено використовувати Bluetooth. Якщо дозвіл не надано, запитується дозвіл.

- Broadcast Receiver: використовується для виявлення підключення та вимкнення пристроїв Bluetooth.

- RecyclerView: використовується для відображення списку підключених пристроїв Bluetooth.

- кнопки навігації: дозволяють користувачеві повернутися до попереднього екрана або перейти до керування вибраним пристроєм.

Методи, які для цього використовуються:

- під час створення (збережений Instance State: Bundle?): метод викликається під час створення активності. Ініціалізує компоненти діяльності та встановлює обробники натискання кнопки.

- отримати інформацію про спарені пристрої: метод, який отримує інформацію про спарені пристрої Bluetooth і відображає їх у списку.

- підключено (пристрій: BluetoothDevice): метод, який перевіряє, чи підключено вказаний пристрій Bluetooth.

- оновити або відобразити інформацію про пристрій (пристрої: HashMap<String, String>): метод, який оновлює або відображає список підключених пристроїв Bluetooth.

- перевірити дозвіл Bluetooth: метод перевірки дозволу на використання Bluetooth. Якщо дозвіл не надано, запитується дозвіл.

- перевірити дозвіл Bluetooth (зворотний виклик: логічний) -> Одиниця): метод, який перевіряє дозвіл Bluetooth і викликає зворотний виклик із результатом.

- ShowToast (message: String): метод, який відображає спливаюче повідомлення з указаним повідомленням.

- перейти до дії (діяльність призначення: Class<out Activity>): метод, який переходить до вказаної дії.

Взаємодія з іншими компонентами:

- Bluetooth Check Screen Activity: за допомогою Picker Screen Activity користувач може повернутися до екрана перевірки стану Bluetooth.



Рисунок 3 – Дизайн керування параметрами підключеного пристрою через Bluetooth

Джерело: розроблено авторами

Панель керування – це діяльність, призначена для керування параметрами підключеного пристрою через Bluetooth. Ця дія дає користувачеві можливість контролювати різні параметри, такі як температура, вологість, частота та інтенсивність світла, а також вибір кольору. Користувач може вводити нові параметри і відправляти їх на пристрій для контролю.

Ключові компоненти:

- зв'язок Bluetooth: використовується для обміну даними з підключеним пристроєм Bluetooth;

- Bluetooth Manager і Bluetooth Adapter: використовуються для доступу до систем обслуговування Bluetooth;

- редагувач тексту та повертач: використовуються для введення даних користувачем;

- TextView і CardView: відображає поточні налаштування пристрою;

- Об'єкт JSON: використовується для стиснення даних параметрів у форматі JSON перед надсиланням на пристрій;

- Broadcast Receiver: використовується для виявлення вимкнення пристрою та повернення до попереднього вікна екрану;

- активність екрана перевірки Bluetooth і активність екрана вибору: із активності панелі керування користувач може повернутися до екрана вибору пристрою Bluetooth або до екрана перевірки стану Bluetooth.

Зв'язок Bluetooth - це клас, призначений для керування зв'язком Bluetooth між пристроями. Цей клас встановлює та розриває з'єднання з пристроєм Bluetooth, надсилає та отримує дані у форматі JSON.

Ключові компоненти:

- роз'єм Bluetooth: використовується для встановлення з'єднання з пристроєм Bluetooth і передачі даних;

- Input Stream і OutputStream: використовуються для читання та запису даних у з'єднання Bluetooth відповідно;
- обробник: використовується для оновлення інтерфейсу користувача з потоку виконання.

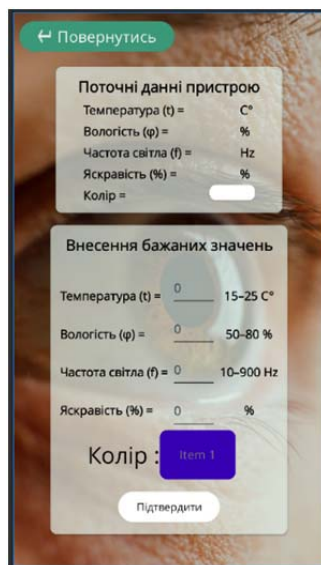


Рисунок 4 – Дизайн призначений для управління пристроєм по Bluetooth

*Джерело: розроблено авторами*

Взаємодія з іншими компонентами:

- **ControlPanelActivity**: цей клас можна використовувати для надсилання даних на пристрій Bluetooth для керування параметрами;
- **Bluetooth Device**: приймає об'єкт **Bluetooth Device** як параметр конструктора для визначення пристрою, з яким потрібно встановити з'єднання;

Адаптер пристроїв - це адаптер **Recycler View**, який відображає список пристроїв Bluetooth. Цей адаптер використовується для відображення списку пристроїв Bluetooth у **Recycler View**. Він надає інтерфейс для обробки відводів пристрою та оновлення даних адаптера.

Основні компоненти:

- **ViewHolder**: внутрішній клас, який представляє елементи списку. Містить посилання на віджети, які відображають назву та адресу пристрою;
- прослуховувач спрацювань на пристрої: інтерфейс для обробки спрацювань на пристроях у списку;
- індекс останнього спрацювання: індекс пристрою, на якому спрацьоване останнє.
- **Color Spinner Adapter** - це адаптер для обертання, який відображає список кольорів. Цей адаптер використовується для відображення списку кольорів у спінері. Він забезпечує перегляд кожного елемента в списку, який містить назву кольору, його шістнадцяткове представлення та зразок кольору.

Основні компоненти:

- **Get View**: метод створення перегляду елемента spinner. Повертає представлення з указаним макетом;
- отримати випадаюче меню: метод для створення розкритого списку елементів. Повертає подання з указаним макетом для відображення розкритого списку;

- перегляд: приватний метод для налаштування виду спінера. Встановлює назву кольору, його шістнадцяткове представлення та зразок кольору.

Взаємодія з іншими компонентами:

- `ControlPanelActivity`: цей адаптер можна використовувати для відображення списку доступних кольорів у лічильнику в інтерфейсі користувача;

- список кольорів - клас, який містить список основних кольорів. Цей клас використовується для створення списку основних кольорів, кожен з яких представлений кольоровим об'єктом. Кожен об'єкт містить назву кольору, його шістнадцяткове представлення та колір фону для забезпечення контрасту.

Основні компоненти:

- основні кольори: метод, який повертає список основних кольорів. Кожен колір представлений кольоровим об'єктом;

- колір за замовчуванням: властивість, що містить об'єкт кольору, що представляє основний колір за замовчуванням;

- положення кольору: метод, який повертає положення кольору в списку основних кольорів;

- `Color Spinner Adapter`: цей список кольорів можна використовувати для створення спінер-адаптера, який відображає доступні кольори.

Дослідження економічної ефективності функціонування розробленого пристрою виконуємо наступним чином. Спочатку розраховуємо собівартість пристрою корекції психоемоційного стану людини. Повну собівартість пристрою розраховуємо за статтями калькуляції:

$$C_{\text{пов}} = M_o + M_d + K_{\text{кв}} + T_v + Z_{\text{ор}} + Z_{\text{др}} + B_c + B_o + B_{\text{цех}} + B_z + B_{\text{ін}} + B_{\text{пв}},$$

де  $M_o$  – витрати на основні матеріали та покупні комплектуючі, грн.;

$M_d$  – витрати на додаткові матеріали, грн.;

$T_v$  – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$Z_{\text{ор}}$  – основна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$Z_{\text{др}}$  – додаткова заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$B_c$  – єдиний соціальний внесок, грн.;

$B_o$  – витрати на утримання та експлуатацію обладнання, грн.;

$B_{\text{цех}}$  – цехові витрати, грн.;

$B_z$  – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{\text{ін}}$  – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{\text{пв}}$  – поза виробничі витрати, грн.

Розрахунок витрат на основні матеріали представлено в табл. 2. Витрати на основні матеріали та покупні комплектуючі пристрою взято укупнено за роздрібними цінами.

Таблиця 2 – Розрахунок витрат на основні матеріали

| № п/п | Назва матеріалу     | Профіль, сорт, розмір | Одиниця вимірювання, кг, м, м <sup>2</sup> | Норма витрати | Ціна одиниці, грн | Всього, грн |
|-------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------------|---------------|-------------------|-------------|
| 1     | Білий матовий акрил | лист, 3 мм            | м <sup>2</sup>                             | 1,0           | 1150,0            | 1150,0      |
| 2     | Дріт                | дріт Ø1,75 мм         | кг                                         | 2,55          | 416,0             | 1248,0      |
|       | Всього              |                       |                                            |               |                   | 2398,0      |

Джерело: розроблено авторами

Розрахунок витрат на закупні комплектуючі представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахунок витрат на закупні комплектуючі

| № п/п | Назва готових виробів                                                           | Тип            | Кільк. одиниць | Ціна одиниці, грн. | Всього, грн   |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|--------------------|---------------|
| 1     | Вимірювальний перетворювач вологості, температури та атмосферного тиску повітря | Bme280         | 1              | 270,0              | 270,0         |
| 2     | SP110E Bluetooth-контролер LED-стрічки                                          | SP110E         | 1              | 253,0              | 253,0         |
| 3     | Світлодіодна LED-стрічка                                                        | ws2812b        | 2              | 160,0              | 320,0         |
| 4     | Годинник реального часу                                                         | ds3231         | 1              | 121,0              | 121,0         |
| 5     | Макетна плата Arduino                                                           | nano           | 2              | 220,0              | 440,0         |
| 6     | Bluetooth-модуль                                                                | hc-06          | 2              | 135,0              | 270,0         |
| 7     | ПК-дисплей                                                                      | 2004           | 1              | 168,0              | 168,0         |
| 8     | Реле часу циклічне                                                              | ADC-0440 ADECS | 1              | 432,0              | 432,0         |
| 9     | Блок живлення 5В, 3А                                                            |                | 1              | 108,0              | 108,0         |
|       | <b>Всього</b>                                                                   |                |                |                    | <b>2382,0</b> |

Джерело: розроблено авторами

Після визначення трудомісткості виготовлення пристрою розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{r(i)} \cdot T_i,$$

де  $n$  – кількість  $i$ -тих видів робіт;

$C_{r(i)}$  – середня годинна тарифна ставка робітників, які виконують  $i$ -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн./год.

Так, основна заробітна плата виробничих робітника на електромонтажних роботах:

$$Z_{op}^{em} = 0,15 \cdot 57,185 = 8,56 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \cdot \frac{\Pi_{во_i}}{100},$$

де  $\Pi_{во_i}$  – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному  $i$ -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на електромонтажних роботах:

$$B_o^{em} = 8,56 \cdot \frac{150}{100} = 12,84 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{цех} = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \cdot \frac{\Pi_{цв_i}}{100},$$

де  $\Pi_{цвi}$  – процент цехових витрат по кожному  $i$ -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для електромонтажних робіт:

$$B_{цех}^{ем} = 8,56 \cdot \frac{132}{100} = 11,3 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей для інших видів робіт, результати заносимо до табл. 4.

Таблиця 4 – Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, включені до собівартості виготовлення пристрою

| Види робіт      | Трудомісткість робіт<br>н-год | Середній розряд | Годинна тарифна<br>ставка робітників,<br>грн./год. | Основна заробітна плата<br>робітників $З_{ор}$ ,<br>грн. | Витрати на<br>утримання та<br>експлуатацію<br>обладнання, $B_o$ |        | Цехові витрати<br>$B_{цех}$ |        |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
|                 |                               |                 |                                                    |                                                          | %                                                               | грн.   | %                           | грн.   |
| Заготівельні    | 0,35                          | 2               | 45,319                                             | 15,86                                                    | 220                                                             | 34,89  | 132                         | 20,94  |
| Механічні       | 0,25                          | 4               | 57,185                                             | 14,30                                                    | 280                                                             | 40,04  | 132                         | 18,88  |
| Термічні        | 0,15                          | 3               | 58,032                                             | 8,71                                                     | 310                                                             | 27,00  | 182                         | 15,85  |
| Електромонтажні | 0,15                          | 4               | 57,185                                             | 8,56                                                     | 150                                                             | 12,84  | 132                         | 11,30  |
| Складальні      | 0,5                           | 4               | 57,185                                             | 28,59                                                    | 150                                                             | 42,89  | 142                         | 40,60  |
| Фарбувальні     | 0,1                           | 2               | 45,319                                             | 4,53                                                     | 110                                                             | 4,98   | 120                         | 5,44   |
| Випробувальні   | 0,25                          | 4               | 66,354                                             | 16,59                                                    | 280                                                             | 46,45  | 132                         | 21,90  |
| Пакувальні      | 0,1                           | 2               | 41,935                                             | 4,19                                                     | 110                                                             | 4,61   | 120                         | 5,03   |
| Інші            | 0,1                           | 3               | 51,466                                             | 5,47                                                     | 180                                                             | 9,84   | 140                         | 7,66   |
| Всього          | 1,95                          | -               | -                                                  | 106,8                                                    | -                                                               | 223,54 | -                           | 147,60 |

Джерело: розроблено авторами

Розрахунок інших статей калькуляції, а також повної собівартості пристрою та його оптової ціни зведено до табл. 5.

Таблиця 5 – Повна собівартість та оптова ціна пристрою

| №<br>п.п. | Стаття калькуляції                     | Позна-<br>чення           | Метод розрахунку,<br>джерело інформації | Результат,<br>сума, грн |
|-----------|----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| 1.        | Матеріали основні                      | $M_o$                     | табл. 2                                 | 2398,0                  |
| 2.        | Матеріали допоміжні                    | $M_d$                     | 4% від $M_o$                            | 95,92                   |
| 3.        | Покупні комплектуючі вироби            | $\Pi_n$                   | табл. 3                                 | 2382,0                  |
| 4.        | Зворотні відходи (віднімаються)        | $-B_{зв}$                 | 6% від $M_o$                            | -143,88                 |
| 5.        | Транспортно-заготівельні витрати       | $T_v$                     | 5% від<br>( $M_o + M_d + \Pi_n$ )       | 292,56                  |
| 6.        | Паливо та енергія на технологічні цілі | $\Pi_{тех},$<br>$E_{тех}$ | 78,8% від $З_{ор}$                      | 116,31                  |

|     |                                                 |           |                               |                |
|-----|-------------------------------------------------|-----------|-------------------------------|----------------|
| 7.  | <b>Всього матеріальні витрати</b>               |           |                               | <b>5140,91</b> |
| 8.  | Основна заробітна плата виробничих робітників   | $Z_{op}$  | табл. 4                       | 106,8          |
| 9.  | Додаткова заробітна плата виробничих робітників | $Z_{др}$  | 10% від $Z_{op}$              | 10,68          |
| 10. | Єдиний соціальний внесок                        | $B_c$     | 22,0% від $(Z_{op} + Z_{др})$ | 25,84          |
| 12. | Витрати на утримання та експлуатацію обладнання | $B_o$     | табл. 3                       | 223,54         |
| 13. | Цехові витрати                                  | $B_{цех}$ | табл. 3                       | 147,6          |
| 14. | Загальнозаводські витрати                       | $K_{зав}$ | 220% від $Z_{op}$             | 234,96         |
| 15. | Інші виробничі витрати                          | $B_{ін}$  | 1,43% від $Z_{op}$            | 1,53           |
| 16. | <b>Виробнича собівартість</b>                   | $C_{вир}$ | $\Sigma ст. (7 \div 15)$      | <b>5891,86</b> |
| 17. | Поза виробничі витрати                          | $K_{пв}$  | 1% від $C_{вир}$              | 58,92          |
| 18. | Повна собівартість                              | $C_{пов}$ | $C_{вир} + K_{пв}$            | 5950,78        |
| 19. | Прибуток                                        | $\Pi_n$   | 20% від $C_{пов}$             | 1190,16        |
| 20. | <b>Оптова ціна</b>                              | $C_{опт}$ | $C_{пов} + \Pi_n$             | <b>7140,94</b> |

Джерело: розроблено авторами

Оптову ціну пристрою розраховуємо за формулою:

$$C_{опт} = C_{пов} \cdot \left[ 1 + \frac{\Pi_{пн}}{100} \right] = 5950,78 \left[ 1 + \frac{20}{100} \right] = 7140,94 \text{ грн.},$$

де  $C_{пов}$  – повна собівартість пристрою, грн.;

$\Pi_{пн}$  – процент нормативного прибутку (рентабельність пристрою), %.

Визначаємо точки беззбитковості для підприємства, що буде виробляти прилад [6,7]:

$$T_{беззб} = \frac{B_{пост}}{C_{опт}^1 - B_{змін}},$$

де  $B_{пост}$ ,  $B_{змін}$  - постійні та змінні витрати.

Приймемо 50 шт. мінімальний випуск приладів в рік (2 роки строк служби) оскільки в Україні 55 - психікареней, 22- психдиспансерів, 3000 лікарень, а страждають на депресію 2,8млн людей(6.3% населення України на 2021р), а на даний час у зв'язку з війною ця кількість ймовірно збільшилась.

Виконуємо розрахунок постійних витрат, для цього використовуємо вихідні дані табл.5 (пп. 13, 14, 17):

$$B_{пост} = B_{цех} + K_{зав} + K_{пв} = 147,6 + 234,96 + 58,92 = 441,48 \cdot 50 = 22074 \text{ грн.}$$

Проводимо розрахунок змінних витрат, для цього використовуємо вихідні дані табл.5 (пп. 16, 13, 14):

$$B_{змін} = C_{вир} - B_{цех} - B_{зав} = 5891,86 - 147,6 - 234,96 = 5509,3 \text{ грн.}$$

Тобто виробництво запропонованого приладу для корекції психоемоційного стану людини буде отримувати прибуток (50шт>14шт). Таким чином, прилад доцільно впровадити у виробництво.

Визначаємо прибуток за рік для виробника. Прибутковість за рік для виробника складає:

$$Пб=(Нв-Тбеззб)(Ц-Взм)-Впост=(50-14)(7140,94-509,3)-22074=216665,04 \text{ грн},$$

де Нв – кількість приладів за рік, штук.

Виконуємо розрахунок собівартості медичної послуги. Для цього використовуємо наступні вихідні дані: тривалість процедури – 30 хвилин., по черзі приймають медичну процедуру 14 пацієнтів. Визначаємо вартість інвестиційного проекту по впровадженню приладу для корекції психоемоційного стану людини в фізіотерапевтичні кабінети медичних закладів. Прилад коштує  $Ц_{опт}=7140,94$  грн. (табл.5 п.20). Передбачаються можливі витрати на косметичний ремонт чи покупка меблів у фізіотерапевтичному кабінеті медичного закладу у розмірі 5тис.грн.

Тобто, капітальні вкладення (К) в проект складають  $K=13140,94$ грн. Оклад посадовий ( $O_n$ ) середніх медичних працівників  $O_n=13500$ грн [5].

Курс медичних процедур складає 30 днів, тобто 1,5 місяця.

Якщо строк служби приладу складає 2 роки (24міс.), тоді заробітна платня одного медичного працівника за період лікування ( $З_m$ ):

$$З_m=13500 \cdot 1,5=20250 \text{ грн.}$$

Заробітна платня на 1 процедуру складає ( $З_n$ ):

$$З_n=20250/14\text{чел}=1446,43 \text{ грн.}$$

Прилад споживає за одну годину 30Вт. Ціна електроенергії 1кВт/год складала 2,64грн/кВт.

Вартість електроенергії на 1 процедуру:

$$В_{ел}=0,03\text{кВт} \cdot 0,5\text{год} \cdot 30\text{дн} \cdot 2,64=1,188 \text{ грн.}$$

Непрямі витрати ( $Н_{вит}$ ) медичного закладу складають 20% від заробітної плати медичного працівника у фізіотерапевтичному кабінеті:

$$Н_{вит}=1446,43 \cdot 0,2=289,29 \text{ грн.}$$

Фонд роботи пристрою за рік:

$$\Phi_{рп}=7\text{год} \cdot 20\text{дн} \cdot 12\text{міс}=1680 \text{ год.}$$

Розрахуємо амортизацію приладу на 1 рік:

$$A=\Phi_{oc}/T_{сл}=7140,94/1680 \cdot 2=2.1253,$$

де  $\Phi_{oc}$ -вартість приладу, грн.;  $T_{сл}$ -термін служби ( $T_{сл}=2$  роки).

Розрахуємо амортизацію приладу відносно однієї медичної процедури ( $A_{мп}$ ):

$$A_{мп}=(7140,94/1680 \cdot 2) \cdot 30 \cdot 0,5=31,88 \text{ грн.}$$

Витрати на «косметичний» ремонт з врахуванням фонду роботи пристрою за рік ( $В_k$ ):  $В_k=(5000/1680 \cdot 5) \cdot 30 \cdot 0,5=8,93$ грн.

Розрахуємо собівартість медичної послуги ( $C_{вмп}$ ):

$$C_{вмп}=1446,43+31,88+8,93+289,29+1,88=1778,41\text{грн}$$

Рентабельність медичних послуг за законодавством України до 25%, приймаємо 20% та 10%

Ціна медичної послуги ( $C_{мп}$ ) за рентабельністю 20% складає:

$$C_{мп} = 1778,41 \cdot 1,2 = 2134,1 \text{ грн.}$$

Прибуток ( $\Pi$ ) визначається різницею ціни медичної послуги ( $C_{мп}$ ) та собівартості ( $C$ ). Прибуток за рентабельністю 20% складає:

$$\Pi_{20\%} = C_{мп} - C = 2134,1 - 1778,41 = 355,69 \text{ грн.}$$

Ціна медичної послуги ( $C_{мп}$ ) за рентабельністю 10% складає:

$$C_{мп} = 1778,41 \cdot 1,1 = 1956,25 \text{ грн.}$$

Прибуток з рентабельністю 10% складає:

$$\Pi_{10\%} = C_{мп} - C = 1956,25 - 1778,41 = 177,84 \text{ грн}$$

За 2 роки експлуатації пристрою прибуток складає:

- з рентабельністю 20%

$$\Pi_{20\%} = 355,69 \text{ грн} \cdot 14 \text{ пацієнтів} \cdot \frac{24 \text{ місяця}}{1,5 \text{ місяця (тривалість)}} = 79674,56 \text{ грн.}$$

- з рентабельністю 10%

$$\Pi_{10\%} = 177,84 \text{ грн} \cdot 14 \text{ пацієнтів} \cdot \frac{24 \text{ місяця}}{1,5 \text{ місяця (тривалість)}} = 39836,16 \text{ грн.}$$

Період окупності ( $T_{ок}$ ) складає:

- з рентабельністю 20%

$$T_{ок} = \frac{K}{\Pi_{20\%}} \cdot 0,165 \cdot 12 \text{ місяців} = 1,98 \text{ місяця}$$

- з рентабельністю 10%

$$T_{ок} = \frac{K}{\Pi_{10\%}} \cdot 0,33 \cdot 12 \text{ місяців} = 3,96 \text{ місяця}$$

За 2 роки 1 прилад в змозі обслуговувати ( $\Pi_o$ ) наступну кількість пацієнтів:

$$\Pi_o = 14 \text{ пацієнтів} \cdot \frac{24 \text{ місяця}}{1,5 \text{ місяця (тривалість)}} \cdot 12 \text{ місяців} = 448 \text{ пацієнтів}$$

Абсолютна ефективність впровадження приладу в медичні заклади дорівнює:

$$Ef = \frac{Pr}{Vit} = \frac{79674,56 \text{ грн}}{13140,94 \text{ грн}} = 6,063,$$

де  $Pr$  – прибуток, грн.;

$Vit$  – витрати, або капітальні інвестиції, грн.

Таким чином, абсолютна ефективність впровадження приладу в медичні заклади складає 6,063 рентабельності вкладень.

**Висновки.** Проведені у роботі дослідження являють собою рішення задач в області створення електронних пристроїв для медичних цілей. В результаті виконаних досліджень було удосконалено раніше нами розроблений електронний пристрій для покращення психоемоційного стану людини. Наведено загальну блок-схему пристрою. Запропоновано власний простий та зручний додаток для смартфона, щоб було зручно дистанційно керувати пристроєм. Приведено дизайн

вікон керування параметрами підключеного пристрою по bluetooth. Наведено компоненти бібліотек запропонованого додатку на смартфон для дистанційного керування пристроєм. Виконано дослідження економічної ефективності функціонування розробленого пристрою. Визначаємо прибуток за рік для виробника; собівартість медичної послуги при використанні пристрою для лікування. Визначено ціну медичної послуги використання пристрою з рентабельністю 20% та 10%. Крім того, розраховано кількість пацієнтів, яку може обслуговувати на протязі 2 років 1 пристрій. Наведено абсолютну ефективність впровадження приладу в медичні заклади.

## Список літератури

1. Задорожна Мар'яна. Хронічна втома – ще не хвороба, але вже й не здоров'я. *Охорона праці і пожежна безпека*. 2016. № 12. URL: <https://oppb.com.ua/content/hronichna-vtoma-shche-nehvoroba-ale-vzhe-y-ne-zdorovya> (дата звернення: 26.08.2024)
2. Інна Набока. Модний діагноз. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/969682.html> (дата звернення: 26.08.2024)
3. Мозок сприймає різні кольори через окремі схеми активності. URL: <https://www.nauka.ua/news/mozok-spriymaye-rizni-kolori-cherez-okremi-shemiaktivnosti?fbclid=IwAR1PqOxLE049UfUtBm6OeRxLGnqPH-CeKxgcr2aBjXELjGVi4XjJly3id8> (дата звернення: 27.08.2024)
4. Щепін В.В., Трушаков Д.В., Сіріков О.І. Пристрій для корекції психоемоційного стану людини. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4(35). С.100-110. URL: <http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/35.html> (дата звернення: 26.08.2024)
5. Патент на корисну модель № 150453. Пристрій для корекції психоемоційного стану людини. МПК:Н03J 9/06, G02B 26/04. U202106072. Щепін В.В., Трушаков Д.В. Заявл. 29.10.2021 ; опубл. 16.02.2022, Бюл. № 7.
6. Щепін В.В., Трушаков Д.В. Економічна доцільність використання пристрою для покращення психоемоційного стану водіїв транспортних підприємств. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем». Кропивницький: ЦНТУ, 2024. С.65-66. URL: <http://kntu.kr.ua/science/aktualni-naukovo-practychni-konferencii-2024> (дата звернення: 30.08.2024)
7. Посадовий оклад медичного працівника. URL: <https://medplatforma.com.ua/article/1803-posadoviy-oklad-lkary-a-yak-formutsya> (дата звернення: 30.08.2024)
8. Сідун В.А., Ю.В. Пономарьова. Економіка підприємства: навч. посіб. К. : Центр навчальної літератури, 2006. 356 с
9. Сисоліна Н.П., Савеленко Г.В., Василенко Л.П. Інформаційне забезпечення підприємницької діяльності: навч. посіб. Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2013. 248с.

## References

1. Zadorozhna Mariana. (2016). Khronichna vtoma — shche ne khvoroba, ale vzhe y ne zdorovia [Chronic fatigue is not yet a disease, but neither is it health]. *Okhorona pratsi i pozhezhna bezpeka – Labor protection and fire safety*, 12. Retrieved from: <https://oppb.com.ua/content/hronichna-vtoma-shche-nehvoroba-ale-vzhe-y-ne-zdorovya> [in Ukrainian].
2. Inna Naboka. Modnyi diahnoz. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/969682.html> [in Ukrainian].
3. Mozok spryimaie rizni kolory cherez okremi skhemy aktyvnosti [The brain perceives different colors through separate patterns of activity]. *nauka.ua*. Retrieved from: <https://www.nauka.ua/news/mozok-spriymaye-rizni-kolori-cherez-okremi-shemiaktivnosti?fbclid=IwAR1PqOxLE049UfUtBm6OeRxLGnqPH-CeKxgcr2aBjXELjGVi4XjJly3id8> [in Ukrainian].
4. Shchepin, V.V., Trushakov, D.V. & Sirikov, O.I. (2021). Prystrii dlia korektsii psykhoemotsiinoho stanu liudyny [Creating a Device for the Correction of Psycho-Emotional State of People]. *Tsentrالنukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin/ Nechnical sciences. Issue 4(35)*, 100-110. Retrieved from: <http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/35.html> [in Ukrainian].

5. Patent na korysnu model № 150453. Prystrii dlia korektsii psykhoemotsiinoho stanu liudyny [A device for correcting the psycho-emotional state of a person]. MPK:H03J 9/06, G02B 26/04. U202106072. Shchiepin V.V., Trushakov D.V. Zaiavl. 29.10.2021 ; opubl. 16.02.2022, Biul. №7. [in Ukrainian].
6. Shchiepin, V.V. & Trushakov, D.V. (2024). Ekonomichna dotsilnist vykorystannia prystroi dlia pokrashchennia psykhoemotsiinoho stanu vodiiv transportnykh pidpriemstv [Economic feasibility of using the device to improve the psycho-emotional state of drivers of transport enterprises]. Increasing the reliability and efficiency of machines, processes and systems: Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Kropyvnytskyi: TsNTU, 2024) Materials of the VI International Scientific and Practical Conference (pp.65-66). [in Ukrainian].
7. Posadovyi oklad medychnoho pratsivnyka . *medplatforma.com.ua*. Retrieved fom: <https://medplatforma.com.ua/article/1803-posadoviy-oklad-lkarya-yak-formutsya> [in Ukrainian].
8. Sidun, V.A. & Ponomarova, Yu.V. (2006). *Ekonomikapidpriemstva* [Enterprise economy]. Kyiv : Tsentr navchalnoiliteratury [in Ukrainian].
9. Sysolina, N.P., Savelenko, H.V. & Vasylenko, L.P. (2013). *Informatsiine zabezpechennia pidpriemnytskoi diialnosti* [Information support for business activities]. Kirovohrad: Lysenko V.F. [in Ukrainian].

**Valerii Shchiepin**, student, **Dmitro Trushakov**, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Sysolina**, Assos. Prof., PhD econ. sci., **Marianna Fedotova**, PhD tech. sci., **Oleksandr Kozlovskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Teliuta**, Assos. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Development of a Smartphone Application for Controlling the Device to Improve the Psycho-emotional State of a Person and Research the Effectiveness of the Developed Device**

The article is devoted to the results of the development of a smartphone application for controlling the developed electronic device emitting multi-colored light effects to improve the psycho-emotional state of a person.

There are two main approaches to restoring a person's psycho-emotional state: drug therapy and physical therapy. Drug therapy is the main treatment, but it has a number of side effects. However, there is a certain number of people who do not want to take medicines. With the development of physiotherapy methods, it has become possible to reproduce physical factors with the help of various medical devices with hardware used for therapeutic purposes.

Scientists managed to find out that each shade of color causes different activation of the human brain. It is also known how colors affect the psychophysiological state of a person.

As a result of the analysis of existing devices, we proposed and manufactured a working model of an electronic device that emits multi-colored light effects and also measures the main parameters of the environment - temperature, humidity and atmospheric pressure. This device is also able to control the microclimate change devices in the middle of the room - air conditioner and air humidifier - based on the data of measurements of the temperature and humidity of the environment in the room. Also developed own smartphone application for remote control of the device to improve the psycho-emotional state of a person. A study of the effectiveness of the developed device was conducted.

The general block diagram of the device is given. It offers its own simple and convenient application for a smartphone, so that it is convenient to remotely control the device. The design of windows for controlling the parameters of the connected device via bluetooth is given. The library components of the proposed smartphone application for remote control of the device are given.

A study of the economic efficiency of the developed device was carried out. We determine the profit for the year for the manufacturer; the cost of a medical service when using a device for treatment. The price of the medical service of using the device with a profitability of 20% and 10% was determined. In addition, the number of patients that can be served by 1 device during 2 years is calculated. The absolute effectiveness of the introduction of the device in medical institutions is given.

**electronic device, microcontroller, multi-colored light effects, psycho-emotional state of a person, smartphone application, efficiency of functioning**

*Одержано (Received) 11.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 656.078

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.60-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.60-67)

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **С.Г. Ковальов**, докторант, канд. пед. наук,  
**А.В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук

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

*e-mail: aulinvv@gmail.com, kovalyovserggr@ukr.net*

**В.В. Варваров**, пров. наук. співр., канд. техн. наук

*Харківський національний університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, м. Харків,  
Україна*

*e-mail: varvarov\_@ukr.net*

## Алгоритм оптимізації надійності функціонування та ефективності використання виробничого обладнання методами штучного інтелекту

Зміст статті орієнтований на проблематику підвищення надійності та ефективності виробничих процесів за рахунок зниження витрат на обслуговування та мінімізації простоїв. Представлено підхід, який передбачає оптимізацію технічного обслуговування виробничого обладнання на основі алгоритмів штучного інтелекту. Розглядається методика використання теорії марківських процесів в контексті навчання з підкріпленням і її застосування для моделювання виробничого середовища. Проведене дослідження дає змогу говорити про значне покращення надійності та продуктивності виробничого обладнання у виробничій системі завдяки впровадженню ШІ-технологій.

**виробнича система, виробниче обладнання, штучний інтелект, марківські процеси, надійність функціонування, ефективність використання**

**Постановка проблеми.** Важливою складовою забезпечення ефективного функціонування сучасного виробництва є надійність роботи та ефективність використання виробничого обладнання. Підтримування параметрів надійності та ефективності обладнання у необхідному діапазоні забезпечується вчасним проведенням необхідних технічних дій. Традиційно вчасне проведення технічного обслуговування (ТО) та ремонту, виконують у визначені інтервали часу або при виникненні відмов, що не є оптимальним у процесі виробництва. Негативний вплив на виробництво здійснює непередбачувані простої та підвищення витрат на використання обладнання.

Вирішення цієї проблеми потребує залучення інноваційних дослідницьких методів та механізмів, що здатні підвищити інформаційну складову використання виробничого обладнання. Інформаційна складова дозволяє інтегрувати у виробничий процес сучасні інформаційні методи в тому числі і інтелектуальні системи, які здатні комплексно виконувати діагностику, контроль, прогнозування та адаптацію до умов функціонування самої виробничої системи.

На сьогоднішній день серед інтелектуальних виробничих систем найбільш перспективними, досліджуваними та затребуваними є моделі та алгоритми штучного інтелекту (ШІ)[1], а тому дослідження застосуванням ШІ для підвищення надійності функціонування та ефективності використання обладнання у виробничому процесі є безумовно актуальною науковою проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виробничі процеси та зміни технічного стану виробничого обладнання можливо описати теорією марківських процесів [2,3]. При цьому виробниче обладнання розглядається як підсистема, що входить у виробничу систему. Теорія марківських процесів є потужним інструментом для опису складних систем, які можуть перебувати у деяких станах  $S$ , перехід між якими має стохастичний характер. Такий інструмент добре підходить для моделювання параметрів надійності та ефективності виробничого обладнання, які теж носять стохастичний або відносний характер[4].

Основною властивістю марківських процесів є умова, що майбутній стан системи залежать тільки від теперішнього стану і умовно не залежить від минулого її стану. Математично це можна записати через ймовірність виникнення подій, які відбулись в минулому, теперішньому та будуть відбуватись в майбутньому часі [3]:

$$P(\text{Майбутнє} \mid \text{Минуле} \cap \text{Сучасне}) = P(\text{Майбутнє} \mid \text{Сучасне}). \quad (1)$$

Важливими понятійними елементами у теорії марківських процесів є: матриця ймовірностей переходу між станами системи— $\{p_{ij}\}$ , вектор ймовірностей перебування системи у деякому стані -  $P$  та теорема про матрицю ймовірностей переходу між станами на  $n$ - кроків:

$$P = P' \cdot \{p_{ij}\}, \quad (2)$$

де –  $P$  вектор ймовірностей знаходження системи у деякому стані для поточної ітерації;

$P'$  – вектор ймовірностей знаходження системи у деякому стані для попередньої ітерації;

$\{p_{ij}\}$  – матриця ймовірності переходу між станами системи.

Матриця ймовірностей  $\{p_{ij}\}$  формується з графа, у вузлах якого відображені усі стани системи, а у ребрах графу містять значення ймовірності переходу від  $i$ -го до  $j$ -го стану. Вектор ймовірності стану системи  $P$  має координати, значення яких відповідають ймовірності перебування системи у відповідному стані.

Враховуючи, що марківські процеси є однорідними із зазначеної вище теореми впливає співвідношення, яке дозволяє знаходження вектора ймовірності перебування системи в деякому стані на основу попереднього його значення та матриці ймовірності переходів між станами, яка формується на основі поточного стану системи[2,3].

Для розв'язання завдань марківських процесів останнім часом намагаються використовувати різні методи ШІ, одним з різновидів яких є машинне навчання [5,6]. Машинне навчання поділяється на супервізоване навчання (Supervised Learning, SL), ненаглядне навчання (Unsupervised Learning, UL) та навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL). Навчання з підкріпленням базується на теорії марківських процесів і дозволяє точно моделювати динаміку технічних станів виробничого обладнання. Враховуючи ймовірності переходів між станами, така модель ШІ добре відповідає дослідницьким вимогам у розглядуваному контексті.

Навчання з підкріпленням RL — це метод машинного навчання, де агент навчається приймати рішення шляхом взаємодії з середовищем і отримання зворотного зв'язку у вигляді винагород або штрафів. Основна мета агента — максимізувати сукупну винагороду з часом [7,8].

RL-модель навчання передбачає три реалізації: Q-навчання, SARSA та DQN навчання. Q-навчання і DQN-навчання у своєму алгоритмі використовують Q-функцію, яка повертає довготривалу винагороду агенту за виконану ним дію  $a$  в стані  $S_a$ . При цьому, відмінність між Q- та DQN-навчаннями полягає у тому, що у Q-навчанні Q-функція задається таблицею, а у випадку DQN-навчання її роль виконує штучна нейронна мережа [3,9,10].

Агент у середовищі виробничої системи перебуває в певному стані  $S_a$  у якому він виконує дію  $a$ , після чого переходить у інший стан. Цей процес виконується циклічно. У випадку Q-навчання для виконання однієї дії і переходу у інший стан, агент виконує наступний алгоритм [11,13]:

1. Агент визначає свій стан  $S_a$  і отримує список можливих дій  $a$  у цьому стані.
2. Для кожної дії  $a$  викликається функція –  $Q(s,a)$ , яка повертає табличне значення, яке є довготривалою винагородою агента для конкретної дії  $a$  у поточному стані системи  $S$ .
3. Отримавши множину значень довготривалих винагород  $m_{ij}$  для кожної пари  $(s, a_i)$ , політика (компонент агента) відбирає на основі усіх отриманих значень від  $Q$ -функції лише одну оптимальну дію і агент її виконує.
4. Виконавши обрану політикою дію  $a$ , агент переходить у наступний стан, а середовище передає агенту миттєву винагороду за виконану дію (винагорода може бути від'ємною, тобто покарання).
5. На основі отриманої винагороди корегується функція  $Q(s, a)$ , а саме, корегується значення довготривалої винагороди за виконану дію. Формула за якою відбувається корекція називається формулою Беллмана:

$$Q_{\text{корект}}(s_b, a_t) = Q(s_b, a_t) + \alpha (r_t + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_b, a_t)), \quad (3)$$

де  $\alpha$  – швидкість навчання,  
 $r_t$  – негайна винагорода,  
 $\gamma$  – коефіцієнт дискотування,  
 $\max_{a'} Q(s_{t+1}, a')$  – максимально очікувана довгострокова винагорода для наступного стану  $s_{t+1}$  та дії  $a'$ .

6. Зазначений цикл повторюється для наступних станів [13,14].

Виконуючи вище описаний алгоритм, агент оптимізує свої дії так, щоб отримати максимальне значення довготривалої винагороди і цим самим формує стратегію оптимального функціонування виробничого обладнання в даному середовищі виробничої системи.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є побудова алгоритму підвищення надійності та ефективності виробничого обладнання шляхом впровадження технологій штучного інтелекту, зокрема моделей навчання з підкріпленням та теорії марківських процесів, оптимізацією технічного обслуговування, прогнозуванням відмов та плануванням профілактичних заходів, що сприятиме зниженню витрат на обслуговування та мінімізації простоїв, а також покращенню продуктивності виробничих процесів.

Для реалізації мети розв'язувалися наступні завдання:

1. З'ясувати використання моделей навчання з підкріпленням і теорії марківських процесів у виробничих системах та оцінити їх вплив на підвищення надійності функціонування та ефективності використання обладнання.
2. Створити алгоритми для прогнозування можливих відмов виробничого обладнання та розробити стратегії планування профілактичних заходів з метою мінімізації простоїв та зниження витрат на технічне обслуговування.
3. Провести дослідження щодо впровадження III-технологій у виробничі процеси та визначити їх вплив на покращення продуктивності використання та надійності функціонування обладнання у виробничій системі, що сприятиме оптимізації ефективного функціонування сучасного виробництва.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо моделювання функціонування виробничої системи з оптимізацією параметрів надійності функціонування та ефективності використання її обладнання за допомогою RL-методу машинного

навчання. Основна мета застосування RL-методу передбачає створення оптимальної системи динамічного контролю надійності та ефективності виробничого процесу, що дозволить прогнозувати можливі відмови та виконувати адаптацію графіку ТО обладнання у режимі реального часу. Це дозволить мінімізувати простой та знизити витрати на обслуговування, а також підвищити загальну ефективність виробничих процесів.

Виробниче обладнання умовно розглядаємо як підсистему середовища виробничої системи, що може перебувати у шести станах:

- робочий стан  $S_1$ , в якому обладнання працює належним чином, виконуючи свої функції з оптимальною продуктивністю;
- стан очікування  $S_2$ , коли обладнання готове до роботи, але очікує на завдання або матеріали;
- стан простою  $S_3$ , для якого характерно те, що обладнання не працює, але готове до запуску, ситуація корисна для зниження енергоспоживання під час перерв;
- стан технічного обслуговування  $S_4$ , коли обладнання знаходиться в процесі планового або непланового технічного обслуговування для запобігання несправності та пошкодження обладнання або відновлення його працездатності;
- стан несправності  $S_5$ , в якому обладнання вийшло з ладу і потребує ремонту або заміни.
- стан деградації  $S_6$ , коли обладнання працює, але знижена продуктивність або ефективність через спрацювання.

Сукупність станів середовища виробничої системи наведено на рис.1 у вигляді графу.

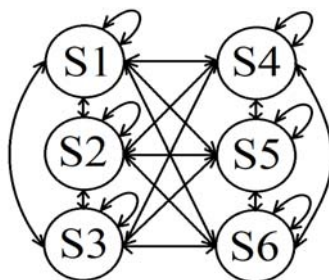


Рисунок 1 – Граф станів середовища виробничої системи

Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що між станами середовища виробничої системи є взаємозв'язки і взаємопереходи, відображені дуговими та прямими двосторонніми векторами. Кожен із векторів характеризують числа, які вказують на ймовірність переходу між відповідними станами. Таке представлення середовища відповідає марківській моделі, де перехід між станами системи має стохастичний характер і описується матрицею ймовірностей переходу між існуючими станами середовища. Дані рис. 1 дають можливість побудувати матрицю ймовірностей станів виробничого середовища (рис. 2).

$$\{p_{ij}\} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{pmatrix}; \quad \{p_{ij}\} = \begin{pmatrix} 0,3 & 0,2 & 0,29 & 0,1 & 0,01 & 0,1 \\ 0,2 & 0,1 & 0,3 & 0,1 & 0,2 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,3 & 0 & 0,2 & 0,3 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,2 \\ 0,01 & 0,2 & 0,2 & 0,1 & 0,29 & 0,2 \\ 0,1 & 0,1 & 0,3 & 0 & 0,2 & 0,2 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2 – Представлення марковської матриці ймовірностей переходу виробничої системи між доступними станами середовища: а - загальний вигляд; б – конкретизований стан

Джерело: розроблено авторами

Як зазначалось вище, алгоритм RL-навчання працює циклічно і для його реалізації потрібна певна кількість ітерацій[3,14]. На практиці елементи матриці ймовірностей  $\{p_{ij}\}$  формуються для кожної ітерації на основі апаратних, програмно-інформаційних засобів, що інтегровані у виробниче обладнання виробничої системи [15]. Їх можливе визначення на основі вимірювань тривалості експлуатації, рівня завантаження і спрацювання обладнання, загальної інформації про обладнання: кількість відмов різних вузлів, затрати на ТО та ремонт.

Маючи матрицю ймовірностей переходу між станами, можна визначити вектор ймовірностей знаходження виробничої системи у конкретному стані. Визначення вектора ймовірностей для поточної ітерації передбачає операцію множення вектора ймовірностей для попередньої ітерації на матрицю ймовірностей переходу системи між станами, яка отримана для поточної ітерації (2). Такий підхід дозволяє розраховувати на основі стохастичних методів, що описані у теорії марківських процесів, стан виробничої системи з ймовірнісним характером. На початку навчання координати вектора ймовірності перебування у певному стані. Приймають, що всі вони рівні нулю за виключенням однієї координати, що визначає стартовий стан агента, відповідно, ця координата має значення одиниці.

Виходячи з графу станів виробничої системи (рис. 1), в матричному вигляді представлення її є таблиця Q-функції, орієнтована на середовище виробничої системи.

Таблиця 1 – Матричне представлення станів виробничої системи

| Стан виробничої системи  | Продовжуват<br>и поточний | Перейти в<br>стан простою | Перейти в<br>стан ТО | Запустити<br>обладнання | Перейти в<br>стан | Завершити<br>ТО | Ремонт<br>обладнання | Замінити<br>обладнання |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------|
| Робочий стан, $S_1$      | Q11                       | Q12                       | Q13                  | -                       | Q15               | -               | Q17                  | Q18                    |
| Стан очікування, $S_2$   | Q21                       | Q22                       | Q23                  | Q24                     | -                 | -               | Q27                  | Q28                    |
| Стан простою, $S_3$      | Q31                       | -                         | Q33                  | Q34                     | -                 | -               | Q37                  | Q38                    |
| Стан ТО, $S_4$           | Q41                       | Q42                       | -                    | -                       | -                 | Q46             | Q47                  | Q48                    |
| Стан деградації, $S_5$   | Q51                       | Q52                       | Q53                  | -                       | Q55               | -               | Q57                  | Q58                    |
| Стан несправності, $S_6$ | Q61                       | Q62                       | Q63                  | Q64-                    | Q65               | Q66             | Q67                  | Q68                    |

Джерело: розроблено авторами

Коефіцієнти  $Q_{mn}$  в таблиці 1 мають загальний вигляд і на початку навчання вони всі рівні 0,5. Таке значення визначається рівноймовірністю дій, які може виконувати агент на початку вивчення виробничого середовища. У процесі навчання ці коефіцієнти корегуються до стану, у якому виробнича система буде мати оптимальний варіант функціонування.

На основі розглянутого побудуємо алгоритм для кожної ітерації, що реалізує агент у відповідності до Q-навчання при моделюванні виробничого обладнання у відповідності до станів виробничої системи, відображеної на рис.1:

1. Агент обраховує стохастичне значення свого стану на основі матриці ймовірностей та вектора ймовірностей для попередньої ітерації і отримує від середовища виробничої системи список дій, які він може виконати у цьому стані. Стани

та відповідні дії агента відображені у таблиці 1.

2. Агент використовує Q-функцію (Таблиця 1) і визначає для кожної можливої дії значення довготривалої винагороди, що дозволяє йому отримати множину пар: дія, довготривала винагорода.

3. Масив пар (дія, довготривала винагорода) передається для аналізу до об'єкта політика, яка обирає дію для поточного стану. Це може бути: проведення ТО, заміна вузлів, продовження перебування в поточному стані та ін., що на логіку політики призведе до максимального значення довготривалої винагороди. Така політика функціонування агента дозволяє йому вибудовувати оптимальну стратегію пристосування до середовища.

4. Після виконання дії агент переходить умовно до іншого стану і отримує від середовища короткотривалу винагороду на основі якої, за допомогою формули Беллмана здійснюється корекція Q-функції, що відповідає накопиченню досвіду агента. Для прикладу відзначимо, що перебуваючи у стані деградації, агент може прийняти рішення про ТО чи ремонт виробничого обладнання, що дозволить йому отримувати позитивну короткотривалу винагороду, а у випадку прийняття рішення про простій матиме покарання і негативний довгостроковий досвід тощо.

5. Перехід до наступної ітерації описаного алгоритму.

Таким чином, моделювання середовища виробничої системи за допомогою Q-навчання у випадку, коли середовище буде відрізнятися кількістю станів чи набором допустимих дій у цих станах, є подібним до розглядуваного і не порушує логіки побудови та використання запропонованої моделі.

**Висновки:** 1. Показано, що впровадження штучного інтелекту, зокрема моделей навчання з підкріпленням та теорії марківських процесів в середовищі виробничої системи, дозволяє значно підвищити надійність функціонування та ефективність використання виробничого обладнання в ньому.

2. Відзначено, що прогнозуванням можливих відмов та плануванням профілактичних заходів, можливо знизити витрати на обслуговування та мінімізувати простої виробничого обладнання.

3. Результати дослідження свідчать, що використання технологій штучного інтелекту сприяють покращенню продуктивності та надійності виробничих процесів, що є важливим кроком до оптимізації ефективного функціонування сучасного виробництва з належним рівнем надійності виробничого обладнання та ефективності його використання.

## Список літератури

1. Miguel Neves, Miguel Vieira, and Pedro Neto. "A study on a Q-Learning algorithm application to a manufacturing assembly problem". In: Journal of Manufacturing Systems 59 (2021), P. 426–440.
2. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В. Синергетика підвищення надійності машин використанням моделей марківських процесів. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сх машин і знарядь*: зб. матеріалів доп. учасн. V Всеукраїнської науково-практичної конф. Житомир: Житомирський агротехнічний коледж, 2019. С. 242-245.
3. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О.В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. 428 с.
4. Zhao, M.; Lu, H.; Yang, S.; Guo, F. The Experience-Memory Q-Learning Algorithm for Robot Path Planning in Unknown Environment. IEEE Access 2020, 8. P. 47824–47844.
5. Palacio, J.C.; Jiménez, Y.M.; Schietgat, L.; Van Doninck, B.; Nowé, A. A Q-Learning algorithm for flexible job shop scheduling in a real-world manufacturing scenario. Procedia CIRP 2022, 106. P. 227–232.

6. Ha D. Reinforcement learning for improving agent design. *Artificial life*. 2019. T. 25, № 4. P. 352–365. URL: [https://doi.org/10.1162/artl\\_a\\_00301](https://doi.org/10.1162/artl_a_00301).
7. Han R., Chen K., Tan C. Curiosity - driven recommendation strategy for adaptive learning via deep reinforcement learning. *British journal of mathematical and statistical psychology*. 2020. T. 73, № 3. P. 522–540. URL: <https://doi.org/10.1111/bmsp.12199>.
8. Inverse reinforcement learning-based time-dependent A\* planner for human-aware robot navigation with local vision / S. Sun et al. *Advanced robotics*. 2020. T. 34, № 13. P. 888–901. URL: <https://doi.org/10.1080/01691864.2020.1753569>.
9. L. A. P., Fu M. C. Risk-Sensitive reinforcement learning via policy gradient search. *Foundations and trends® in machine learning*. 2022. T. 15, № 5. P. 537–693. URL: <https://doi.org/10.1561/22000000091>.
10. Reinforcement learning and adaptive optimization of a class of Markov jump systems with completely unknown dynamic information / S. He et al. *Neural computing and applications*. 2019. T. 32, № 18. P. 14311–14320. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04180-2>.
11. Reinforcement learning / B. L. Moore et al. *Anesthesia & analgesia*. 2011. T. 112, № 2. P. 360–367. URL: <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31820334a7>.
12. Reinforcement learning for logistics and supply chain management: methodologies, state of the art, and future opportunities / Y. Yan et al. *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2022. Vol. 162. 102712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102712>.
13. Dynamic handoff policy for RAN slicing by exploiting deep reinforcement learning / Y. Wu et al. *EURASIP journal on wireless communications and networking*. 2021. T. 2021, № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01939-x>.
14. Deep deterministic policy gradient for navigation of mobile robots in simulated environments / J. C. Jesus et al. 2019 19th international conference on advanced robotics (ICAR), м. Belo Horizonte, Brazil, 2–6 груд. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/icar46387.2019.8981638>.
15. Ковальов С.Г. Ковальов Ю.Г. Особливості реалізації моделі штучної нейронної мережі апаратними засобами. «Наука і техніка сьогодні» (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): журнал. 2024. №6(34) 2024. 1131с. URL: DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34))

## References

1. Neves, M., Vieira, M., & Neto, P. (2021). A study on a Q-Learning algorithm application to a manufacturing assembly problem. *Journal of Manufacturing Systems*, P. 426–440.
2. Aulin, V. V., Hrynkyv, A. V., Lysenko, S. V., & Holub, D. V. (2019). Synergetyka pidvyshchennia nadiinosti mashyn vykorystanniam modelei markivskykh protsesiv [Synergetics of increasing machine reliability using Markov process models]. *Perspektyvy i tendentsii rozvytku konstrukttsii ta tekhnichnoho servisu shk mashyn i znariad: zb. materialiv dop. uchashnykiv V Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konf [Perspectives and trends in the development of constructions and technical service of machines and tools: collection. additional materials participation V All-Ukrainian Scientific and Practical Conf]* Zhytomyr: Zhytomyrskyi ahrotekhnichnyi koledzh, P. 242-245 (in Ukrainian).
3. Aulin, V. V., Hrynkyv, A. V., Holovaty, A. O., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Kuzyk, O. V., & Tykhyi, A. A. (2020). Metodolohichni osnovy proektuvannia ta funktsionuvannia intelektualnykh transportnykh i vyrobnychykh system [Methodological principles of designing and functioning of intelligent transport and production system] (Prof. V.V.Aulin Ed) Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F., 2020. 428 p.
4. Zhao, M., Lu, H., Yang, S., & Guo, F. (2020). The Experience-Memory Q-Learning Algorithm for Robot Path Planning in Unknown Environment. *IEEE Access*, 8. P. 47824–47844.
5. Palacio, J.C., Jiménez, Y.M., Schietgat, L., Van Doninck, B., & Nowé, A. (2022). A Q-Learning algorithm for flexible job shop scheduling in a real-world manufacturing scenario. *Procedia CIRP*, 106, P. 227–232.
6. Ha, D. (2019). Reinforcement learning for improving agent design. *Artificial Life*, 25(4), P. 352–365.
7. Han, R., Chen, K., & Tan, C. (2020). Curiosity-driven recommendation strategy for adaptive learning via deep reinforcement learning. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 73(3), P. 522–540.
8. Sun, S. (2020). Inverse reinforcement learning-based time-dependent A\* planner for human-aware robot navigation with local vision. *Advanced Robotics*, 34(13), P. 888–901
9. L. A. P., & Fu, M. C. (2022). Risk-Sensitive reinforcement learning via policy gradient search. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 15(5), P. 537–693.
10. He, S., et al. (2019). Reinforcement learning and adaptive optimization of a class of Markov jump systems with completely unknown dynamic information. *Neural Computing and Applications*, 32(18), P. 14311–14320.

11. Moore, B. L., et al. (2011). Reinforcement learning. *Anesthesia & Analgesia*, 112(2), P. 360–367.
12. Yan, Y., et al. (2022). Reinforcement learning for logistics and supply chain management: methodologies, state of the art, and future opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 102712.
13. Wu, Y., et al. (2021). Dynamic handoff policy for RAN slicing by exploiting deep reinforcement learning. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021(1).
14. Jesus, J. C., et al. (2019). Deep deterministic policy gradient for navigation of mobile robots in simulated environments. *19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Belo Horizonte, Brazil.
15. Kovalov, S. H., & Kovalov, Yu. H. (2024). Osoblyvosti realizatsiia modeli shchuchnoi neironnoi merezhi aparatnyy zasobamy [Features of implementing the model of artificial neural network with hardware means]. *Nauka i tekhnika sohodni..*, No6(34), 1131. (in Ukrainian).

**Victor Aulin**, Prof., DSc, **Serhiy Kovalov**, Doctoral student, PhDped. sci., **Andriy Hrynkiv**, Senior Researcher PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Valeriy Varvarov**, Leading researcher, PhDtech. sci..

*Kharkiv National Ivan Kozhedub Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

### **Algorithm for Optimizing the Reliability of Operation and Efficiency of Use of Production Equipment Using Artificial Intelligence Methods**

This paper presents an innovative approach that involves the optimization of maintenance for production equipment by leveraging advanced artificial intelligence (AI) algorithms. The study explores the application of Markov process theory within the context of reinforcement learning and its integration into the modeling of production environments. The focus of this research is to address critical issues related to enhancing the reliability and efficiency of production processes. This is achieved by reducing maintenance costs and minimizing equipment downtime.

The proposed model for optimizing the use of the production equipment system is described as an environment with discrete states, where an agent operates with the capability to perform specific actions. This model emphasizes the implementation of the Q-learning algorithm, a form of reinforcement learning that aims to optimize production processes by enabling the agent to learn and make decisions that enhance system performance. Through the iterative process of Q-learning, the agent evaluates the potential benefits of various actions in different states, gradually refining its strategy to maximize long-term rewards.

Q-learning, with its ability to handle environments with unknown dynamics, is particularly effective in this context. It helps the agent to develop an optimal maintenance policy by balancing immediate maintenance costs against the long-term benefits of reduced downtime and extended equipment lifespan. The iterative nature of Q-learning ensures continuous improvement and adaptation, making the system robust against varying operational conditions and unforeseen disruptions.

Through rigorous analysis and experimentation, the findings demonstrate a significant improvement in the reliability and productivity of the production equipment system. The introduction of AI technologies, specifically through the Q-learning framework, not only streamlines maintenance practices but also ensures a more efficient utilization of resources, ultimately leading to a more robust and cost-effective production environment. The results of this study highlight the potential of AI in transforming traditional production maintenance strategies and setting new standards for operational excellence.

**production system, production equipment, artificial intelligence, Markov processes, reliability of functioning, efficiency of use**

*Одержано (Received) 15.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,  
ЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК621.315.17

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.68-79](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.68-79)**О.А. Козловський**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: kozlovskyioa@gmail.com***С.Й. Рендзіняк**, проф., д-р техн. наук*Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, Україна**e-mail: serhii.y.rendziniak@edu.lpnu.ua***Обґрунтування діагностичних параметрів  
комплексної системи дистанційного діагностування  
повітряних ліній на базі БпЛА**

У статті представлено результати обґрунтування діагностичних параметрів для багатопараметрової системи дистанційного моніторингу повітряних ліній, яка базується на використанні безпілотного літального апарату. Більшість дефектів конструктивних елементів повітряних ліній проявляються у вигляді видимих механічних пошкоджень, тоді як їх решта – прихована. Виявлення таких дефектів можливе за допомогою дистанційних методів неруйнівного контролю. Використовуючи теорію інформації визначено, що для діагностування стану повітряної лінії 110 кВ найбільшу інформативність має група з семи параметрів, до складу якої входять візуальні сигнатури дефектів, температури провідників і контактних з'єднань, а також розрядна активність ізоляторів і струмопровідних частин. Запропонований підхід доцільно використовувати при проведенні техніко-економічного обґрунтування вибору обладнання для систем технічного діагностування ліній.

**повітряна лінія, експлуатаційний дефект, безпілотний літальний апарат, БпЛА, теорія інформації, діагностування, діагностичний параметр**

**Постановка проблеми.** Електричні мережі ОЕС України мають складну та розгалужену структуру. Повітряні лінії (ПЛ), що входять до їх складу, характеризуються значною протяжністю та суттєвим зносом. Наприклад, у системі передачі ОЕС термін служби понад 40-к років мають 41 % ПЛ 750 кВ, 72,4 % ПЛ 330 кВ і 87,7 % ПЛ 220 кВ [1]. Крім того, внаслідок кліматичних змін вони піддаються впливу підвищених механічних навантажень через зростання потужності небезпечних метеорологічних явищ, таких як шквали, льодяні дощі, тощо. Це призводить до зростання кількості ушкоджень і прискорення зносу конструктивних елементів ПЛ. Тому пріоритетним стає належне обслуговування ПЛ, оскільки зростає ризик виникнення значних збитків через можливі технологічні порушення в їх роботі.

Найбільш поширеною системою технічного обслуговування ПЛ є планово-запобіжний ремонт (ПЗР). Характерними рисами якого є недовикористання наявного ресурсу елементів ПЛ, що призводить до завищення загальної трудомісткості ремонтних робіт, а також обов'язкове проведення робіт з нормованою періодичністю, що часто буває передчасним або запізним, оскільки базується на усереднених, а не фактичних даних про технічний стан конкретної ПЛ. Крім того, ПЗР потребує утримання значного штату експлуатаційного персоналу. У сучасних умовах ця система виявляється не ефективною, оскільки ПЛ, особливо зі значним строком служби, потребують дедалі все більших обсягів технічного обслуговування та ремонтів. Всі ці

фактори, зумовлюють зростання витрат електропостачальних компаній на їх ремонти та технічне обслуговування. При цьому наявні обсяги відновлення повітряних ліній не покривають їх фактичного зносу внаслідок дефіциту коштів, що призводить до подальшого старіння мережі [2].

Одним із можливих шляхів подовження терміну експлуатації ПЛ, забезпечення надійності електропостачання та зменшення витрат на їх технічне обслуговування є впровадження в електричні мережі систем технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом. Цей підхід передбачає нерегулярне проведення профілактичних і ремонтних робіт на основі інформації одержаної від системи технічного діагностування (СТД) ПЛ у режимі онлайн. До основних переваг такого підходу належать: наявність достовірної інформації про поточний стан елементів ПЛ; усунення можливості необґрунтованих утручань експлуатаційного персоналу в роботу ПЛ; обґрунтоване визначення необхідних термінів і об'ємів ремонтних робіт; подовження міжремонтного періоду та строку служби ПЛ.

Визначним етапом розвитку СТД ПЛ стала інтеграція до їх складу малих БпЛА [2-7]. Це технічне рішення значно розширило можливості діагностування, дозволивши проводити обстеження ліній електропередавання з більшою деталізацією, ефективністю та безпекою. Оснащення БпЛА цифровими камерами високої роздільної здатності дало змогу отримувати детальні зображення та дані про стан ПЛ на значних ділянках за короткий час, що призвело до суттєвої економії часу, людських і матеріальних ресурсів електропостачальних компаній. Використання БпЛА уможливило обстеження ПЛ під напругою у важкодоступних місцевостях, усунувши необхідність виконання небезпечних верхових робіт електротехнічним персоналом і перебування в безпосередній близькості до ПЛ.

Підхід з використанням БпЛА дозволив реалізувати головний принцип систем технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом – забезпечення максимально можливого напруження обладнання при мінімальних експлуатаційних витратах. Проте, існуючі системи СТД ПЛ на базі БпЛА перебувають на початковій стадії розвитку та потребують удосконалення шляхом розширення їх функціональних можливостей та інтеграції з іншими методами та засобами діагностування. Зокрема, доцільно доповнювати існуючі системи на базі БпЛА засобами неруйнівного контролю та інтелектуальними системами аналізу даних для більш ретельної та всебічної діагностики стану ПЛ.

Отже, розробка систем технічного діагностування повітряних ліній на базі малих безпілотних літальних апаратів є актуальним науково-практичним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У праці [3] представлений огляд сучасних технологій діагностування ПЛ. Запропоновано концепцію проведення інтелектуальних інспекцій ПЛ за допомогою БпЛА з підтримкою технології LIDAR. Ефективність розробленої концепції було підтверджено на базі комерційної системи БпЛА. Відмічено, що використання мультисенсорних систем має переваги та дозволяє подолати обмеження окремих сенсорів і виявляти ширший спектр пошкоджень.

У дослідженні [4] представлено автономну систему діагностування забруднення ізоляторів ПЛ на базі квадрокоптера. Вона складається з двох частин – наземної станції керування (НСК) і спеціалізованого БпЛА. До складу НСК входять ноутбук і пульт керування. Ноутбук призначений для збору телеметричної інформації та обробки зображень із відеопотоку, що надходить з відеокамери дрону. Для проведення інспекції ПЛ складається польотне завдання за допомогою програмного забезпечення Mission Planner, де вказуються GPS-координати кожної електроопори ПЛ. Квадрокоптер здійснює інспекцію ПЛ в автоматичному режимі. Обробка отриманих зображень

ізоляторів здійснюється на ноутбучі за допомогою попередньо навченої згорткової нейронної мережі. Якщо ізолятор класифікується як чистий то БпЛА ніяких дій не виконує і переходить до діагностування наступного ізолятора. У протилежному випадку повідомляються GPS-координати цього ізолятора. Головною перевагою даної СТД низька вартість визначення рівня забруднення ізоляторів, а недоліками – обмежена автономність роботи та вузька спеціалізація.

Більш досконалою СТД поверхневого забруднення ізоляторів ПЛ є система, що складається з НСК та БпЛА обладнаного двома камерами та комп'ютером Raspberry Pi [5]. Пілот у ручному режимі керування відправляє БпЛА до першої контрольної точки польотного завдання, де вмикається автопілот і діагностування ізоляторів проводиться автономно, згідно з попередньо заданим планом. Зображення з камери №1 передаються до НСК для обробки. На основі зображень з камери №2 проводиться класифікація стану ізолятора в режимі реального часу за допомогою Raspberry Pi. Після виконання польотного завдання пілот переводить БпЛА в режим ручного керування та саджає його. Далі проводиться перевірка результатів класифікації стану ізоляторів на основі даних НСК. На відміну від відомих СТД поверхневого забруднення лінійної ізоляції, дана система може в режимі реального часу автоматично проводити оцінку стану ізоляторів. Тобто обробка зображень ізоляторів може проводитися як безпосередньо на самому БпЛА так і на НСК. Однак, реалізація обробки зображень на борту БпЛА має ряд технічних обмежень, що пов'язані з його вантажопідйомністю, ємністю акумулятора та обчислювальними можливостями мікрокомп'ютера.

У [6] розроблено багатоетапну інтелектуальну СТД ПЛ на основі БпЛА, яка дозволяє здійснювати автономне планування маршрутів перевірки, мобільну перевірку та інтелектуальну діагностику ушкоджень. На 1-му етапі основні дані (координати та розміри траверси) отримуються з хмарної бази даних електромережі, а бокове та вертикальне зміщення розраховуються під час роботи дрона. Траєкторія його польоту генерується незалежно, відповідно до типу інспекції. На 2-му етапі під час польоту БпЛА завантажує зроблені фотографії в хмару в режимі реального часу. Стабілізація польоту БпЛА виконується алгоритмом керування ковзним режимом на основі еталонної моделі. На 3-му етапі розробляється програма мобільних перевірок з метою підвищення їх ефективності. Головними перевагами запропонованої СТД є скорочений цикл перевірки та зменшені витрати на обстеження високовольтних ПЛ.

У праці [7] запропоновано структурну схему СТД на базі БпЛА на основі вибору мінімальної кількості параметрів системи діагностування ПЛ. Представлено приклади зразків комерційного обладнання на основі яких можливо реалізувати запропоновану СТД ПЛ.

Розглянуті СТД ПЛ є вузькоспеціалізованими, вони розроблені для контролю одного-, двох діагностичних параметрів ПЛ, які є критичними для мереж певного регіону. Наприклад, забруднення ізоляторів, наявності гнізд птахів на опорах, тощо. Тому, системи технічного діагностування повітряних ліній на базі безпілотних літальних апаратів потребують подальшого удосконалення.

**Постановка завдання.** Обґрунтування діагностичних параметрів для багатопараметрової системи дистанційного моніторингу повітряних ліній, що базуються на використанні безпілотних літальних апаратів.

**Виклад основного матеріалу.** Надійність електропостачання та безпека споживачів електроенергії в значній мірі залежать від стану ПЛ. Правила улаштування електроустановок [8] та Правила охорони електричних мереж [9] висувають ряд вимог до ПЛ, невиконання яких призводить до виникнення їх несправностей [10-12]. Типові

експлуатаційні дефекти ПЛ, які можливо зафіксувати за допомогою дистанційних методів неруйнівного контролю доцільно об'єднати в групи за місцем їх виникнення:

- траса ПЛ;
- стояки залізобетонних і металевих опор;
- траверси;
- проводи та грозозахисні троси;
- лінійна арматура;
- ізолятори.

Основними порушеннями траси ПЛ є:

- наявність у охоронній зоні складських майданчиків, пасовищ, звалищ, шпалер виноградників, зупинок громадського транспорту, тощо;
- недотримання нормативної ширини просік уздовж траси ПЛ;
- наявність на межах траси ПЛ окремих дерев, що загрожують падінням або розростанням на проводи;
- наявність під проводами ПЛ рослинності висотою більше 4 м;
- проведення на трасі будь-яких несанкціонованих робіт або дій, які порушують нормальну роботу ПЛ і сприяють можливості їх ушкодження;
- несправний стан або відсутність попереджувальних знаків, загороджувальних вогнів, відбійних тумб, габаритних воріт тощо.

Тривалий вплив нормативних навантажень і дія короточасних аварійних навантажень на залізобетонні опори в процесі експлуатації призводять до виникнення в них характерних дефектів [10-12]:

- тріщин, локального викришування бетону та оголення арматури в стояках;
- наднормативного відхилення опор від проектного положення;
- втрати деяких конструктивних елементів опор, в т. ч. і кріпильних;
- послаблення та ушкодження відтяжок опор і їх кріплень, талрепів;
- корозії металевих елементів опор;
- відсутності спеціальних позначок, номерів і вказівників;
- наявність на опорах сторонніх предметів;
- відсутності або ушкоджень захистів основи опор від льодоходів.

Корозія є одним із найбільш розповсюджених ушкоджень металевих елементів ПЛ – траверс, тросостояків, з'єднань з/б опор. Металеві кріплення гірлянд ізоляторів мають прискорений знос при галопуванні проводів та їх обривах.

Крім атмосферних чинників, до механічних ушкоджень опор ПЛ також призводять наїзди на них транспортних засобів та сільськогосподарських машин.

Основні експлуатаційні дефекти металевих опор охоплюють:

- атмосферну корозію, ушкодження захисних покриттів металу;
- послаблення болтових і клепаних з'єднань, перекіс гвинтів і заклепок;
- деформацію конструктивних елементів опор;
- дефекти зварних швів;
- наявність сторонніх предметів.

Важливо підкреслити, що найбільш схильними до корозії є горизонтальні елементи металевих опор, зокрема місця їх з'єднань, де атмосферна волога може накопичуватися та зберігатися тривалий час.

Типовими дефектами проводів та грозозахисних тросів, що виникають під час експлуатації ПЛ, є наступні [10-12]:

- опіки, оплавлення, обрив і перегорання окремих дротин верхнього повиву;
- спучування та перекручування дротин;
- перетирання на вході (виході) в затискач;

- витягування проводу зі з'єднувача;
- ушкодження кріплень проводу до штирових ізоляторів;
- природний знос внаслідок атмосферної корозії;
- накиди на провід;
- розрегулювання проводів.

У цілому, ушкодження проводів та грозозахисних тросів є причиною до 56% від всіх аварійних відключень ПЛ [2].

Дефекти лінійної ізоляції можуть мати електричну та механічну природу. До електричних дефектів відносяться такі [10, 11]:

- неорганічні та органічні забруднення ізоляторів;
- тріщини глазури ізоляторів, руйнування фарфору (скла), сліди плавлення на арматурі ізоляторів та на арматурі гірлянд;
- сколи та тріщини фарфору (скла) тарілок ізоляторів;
- наявність «нульових» ізоляторів;
- зігнуті штирі кріплення ізоляторів, виповзання штирів із шапки ізолятора, тріщини в чавунній шапці ізолятора;
- частковий вихід стовпчика з гнізда ізолятора, випадіння шплінтів;
- наднормативне відхилення гірлянд ізоляторів від проектного положення.

Найбільш поширеними експлуатаційними дефектами лінійної арматури є наступні [10, 11]:

- атмосферна корозія, каверни на корпусах;
- тріщини на корпусах штирів і гаків, затискачів, з'єднувачів;
- ослаблення болтових та шплінтових з'єднань, відсутність кріпильних елементів;
- перетирання або деформація окремих елементів арматури;
- зміщення або відсутність гасників вібрації;
- сліди перегріву з'єднувачів;
- наближення петель проводу до опор, значна їх деформація;
- пошкодження захисних рогів і кілець, координуючих проміжків;
- розгинання штирів і гаків, кріплень штирових ізоляторів.

Особливість дефектів лінійної арматури полягає в тому, що вони не проявляються за нормальних умов експлуатації, однак під час складних метеорологічних умов можуть призвести до серйозних аварій.

Отже, проведений аналіз експлуатаційних дефектів конструктивних елементів ПЛ показує, що вони проявляються, у першу чергу, у вигляді різноманітних тріщин, сколів, надломів, обривів, втрати кріпильних елементів, корозійної діяльності, а тому можуть бути ідентифіковані за допомогою оптико-візуального методу неруйнівного контролю. Для виявлення прихованих дефектів, таких як ослаблені контактні з'єднання проводів, «нульові» ізолятори слід застосовувати тепловий метод [13]. Найбільш складним є виявлення дефектів лінійної ізоляції на початковій та середній стадії розвитку. У цьому випадку застосовується метод оптичної УФ-дефектоскопії [14]. Головна перевага цього методу полягає в можливості точного визначення місця розташування коронного розряду на ізоляторі на значній відстані. Через високу вартість технічних засобів УФ-дефектоскопії був розроблений спектрально-акустичний метод виявлення дефектів ізоляції. Який полягає у фіксації акустичних коливань, що виникають внаслідок розширення повітря під час стримерних пробів, коливання об'єму повітря та протікання хімічних реакцій при горінні коронного розряду [15].

Для виявлення порушень траси ПЛ, розрегулювання проводів, відхилення стояків опор вище нормативних значень доцільно використовувати повітряне лазерне

сканування на базі БпЛА [3]. Технологія LIDAR (Light Detection and Ranging) відносно за короткий час дозволяє отримати детальну інформацію про тривимірну структуру елементів ПЛ та їх навколишній рельєф, включаючи рослинність. Обробка отриманої хмари точок за допомогою спеціального програмного забезпечення дає точну інформації про технічний стан ПЛ, а також дозволяє провести моделювання її стану траси в різних погодних умовах. Застосування повітряного лазерного сканування на базі БпЛА довело значну його цінність у багатьох інспекційних завданнях.

Таким чином, значна кількість різновидів ушкоджень ПЛ вимагає одночасного застосування кількох методів дистанційного контролю, що призводить до потреби моніторингу великої кількості діагностичних параметрів. Чим більше з них контролюється під час експлуатації, тим точнішим і достовірнішим буде отриманий діагноз, і тим більшою виявиться повнота його охоплення. Проте, контроль багатьох діагностичних параметрів призводить до значного підвищення складності та вартості СТД ПЛ. Таким чином, у кожному конкретному випадку постає завдання вибору мінімально достатньої кількості діагностичних параметрів для забезпечення ефективного функціонування цих систем [1, 2]. Отже, при розробці СТД ПЛ питання вибору параметрів діагностування є одним з ключових.

Найбільш простою формою запису явної моделі діагнозу ПЛ є таблиця функціональних несправностей [16, 17]. У ній кожній  $i$ -й відмові елемента відповідає несправний стан  $s_i$  із множини  $S (s_i \in S)$ , і навпаки. Стан  $s_i$  визначається за допомогою  $j$ -го елементарного тесту (параметра)  $\pi_j$  із множини всіх допустимих елементарних тестів  $\Pi$ . Таким чином, таблиця представляє собою набір стовпців – станів  $s_i$  та рядків – елементарних тестів (параметрів)  $\pi_j$  елементів ПЛ на перетинах яких отримуються результати  $R_j^i$  елементарних тестів ПЛ. При цьому, множина  $\Pi$  повинна володіти властивістю виявлення несправностей із множини  $S$  (для  $s_i \in S$  існує хоча б одне значення  $\pi_j \in \Pi$ , при цьому  $R_j \neq R_j^i$ ) і властивістю розрізнення всіх несправностей із множини  $S$  (для  $s_i, s_k \in S$ ,  $i \neq k$  існує хоча б одне значення  $\pi_j \in \Pi$ , при цьому  $R_j^i \neq R_j^k$ ), де  $R_j, R_j^i$  – результати елементарних тестів, відповідно, справного та несправного елементів повітряної лінії.

Вибір діагностичних параметрів починається з виключення явно нераціональних із попередньо вибраних. Далі формується мінімально необхідна та достатня група з параметрів, що забезпечують найбільшу інформативну цінність, яка дозволяє визначити стан елементів ПЛ за скінченного числа елементарних тестів. Для визначення мінімальної кількості діагностичних параметрів розроблено ряд критеріїв (наприклад, забезпечення необхідної безвідмовності, інформативний та ін.) на основі аналізу причинно-наслідкових зв'язків між параметрами та дефектами ПЛ. У випадку відсутності фактичних даних про надійність елементів ПЛ вибір діагностичних параметрів можливо виконати за їх середньою інформативністю, що характеризує величину зменшення ентропії ПЛ [16, 17]:

$$I_{\pi_i} = H(S) - H(S|\pi_j), \quad (1)$$

де  $H(S)$  – початкова невизначеність про стан ПЛ до проведення діагностування:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^N P_i \cdot \log_2 P_i, \quad (2)$$

$P_i$  – ймовірність того, що ПЛ знаходиться в  $i$ -му стані;

$N$  – кількість можливих станів ПЛ.

Залишкова невизначеність ділянки повітряної лінії після того, як стали відомими всі реалізації вектора тестів  $\pi_j$  із множини  $\Pi$ :

$$H(S|\pi_j) = \sum_k P(\pi_j = k) H(S|\pi_j = k), \quad (3)$$

Де  $K$  – множина всіх можливих результатів  $k_j$  тестів  $\pi_j$ ;

$P(\pi_j = k)$  – ймовірність того, що результат елементарного тесту ПЛ дорівнює  $k_j$ ;

$H(S|\pi_j = k)$  – умовна ентропія, коли результат тесту дорівнює  $k_j$ .

Якщо розглядати лише ті ушкодження елементів ПЛ, що мають однакову ймовірність відмов, тобто  $P_1 = P_2 = \dots P_i = 1/N$ , де  $N$  – кількість рівноймовірних станів, рівняння (2) дещо спроститься:

$$H(S) = \log_2 N. \quad (4)$$

Тоді (3) можливо записати наступним чином:

$$H(S|\pi_j) = \frac{n}{N} \log_2 n + \frac{m}{N} \log_2 m, \quad (5)$$

де  $n, m$  – число, відповідно, одиниць і нулів у результаті параметру  $\pi_j$ .

Підставивши (4) і (5) у (1) отримаємо інформативність, що характеризує залишкову ентропію після проведення  $N$  елементарних тестів

$$I_{\Pi_i} = \log_2 N - \left[ \frac{n}{N} \log_2 n + \frac{m}{N} \log_2 m \right]. \quad (6)$$

Процес визначення діагностичних параметрів за допомогою інформативного критерію включає кілька етапів. На 1-му етапі розраховується залишкова ентропія ПЛ після проведення кожного елементарного тесту. На 2-му етапі аналізуються комбінації діагностичного параметра з мінімальною залишковою невизначеністю з

1-го етапу зі всіма іншими параметрами, тобто розглядаються пари параметрів. На наступних етапах аналогічно розглядаються комбінації з трьох, чотирьох параметрів і т. д. Процес вибору діагностичних параметрів вважається завершеним, якщо залишкова ентропія наближається до нуля:  $H(S|\pi_j) \approx 0$ , а інформативність, що її характеризує до початкової ентропії системи  $I_{\Pi_i} \approx H(S)$ .

На основі типових дефектів сформуємо перелік діагностичних параметрів для повітряної лінії напругою 110 кВ:

- $\pi_1$  – візуальні сигнатури дефектів лінійної арматури;
- $\pi_2$  – візуальні сигнатури дефектів проводу (грозозахисного тросу);
- $\pi_3$  – візуальні сигнатури дефектів опори (у т.ч. траверси та стояка опори);
- $\pi_4$  – візуальні сигнатури механічних дефектів ізоляторів;
- $\pi_5$  – візуальні сигнатури ушкодження траси ПЛ;
- $\pi_6$  – температура провідників і контактних з'єднань;
- $\pi_7$  – граничні зближення, провисання проводів (тросу);
- $\pi_8$  – граничні відхилення елементів опор від проектного положення;
- $\pi_9$  – граничні відстані між навколишніми об'єктами та ПЛ;
- $\pi_{10}$  – розрядна активність ізоляторів і струмопровідних частин;

$\pi_{11}$  – спектроакустичні сигнатури коронного розряду елементів ПЛ.

Виходячи з припущення, що елементи ПЛ мають однакову ймовірність відмов до розгляду приймаються лише ті дефекти вузлів, експлуатація яких в найближчій перспективі становить небезпеку для працездатності ПЛ:

- $s_1$  – перевищення допустимої температури провідників і контактних з'єднань;
- $s_2$  – обрив проводу (грозозахисного тросу);
- $s_3$  – руйнування дротин верхнього повиву проводу (грозозахисного тросу);
- $s_4$  – понаднормове розрегулювання проводів (грозозахисного тросу);
- $s_5$  – видимі механічні дефекти ізоляторів;
- $s_6$  – невидимі механічні дефекти ізоляторів (мікротріщини);
- $s_7$  – нульові (пробиті) ізолятори;
- $s_8$  – відсутність, корозія, механічні ушкодження лінійної арматури;
- $s_9$  – відсутність, корозія елементів опор;
- $s_{10}$  – граничні деформації, зміщення елементів опор;
- $s_{11}$  – ушкодження траси ПЛ.

На основі вибраних дефектів та діагностичних параметрів було складено таблицю можливих станів ПЛ (табл. 1). У ній відсутні однакові стовбці, що свідчить, що сформований перелік дефектів забезпечує розрізнення всіх станів  $s_1 - s_{11}$  ПЛ. Однак, цей набір містить надлишкову кількість параметрів, а тому потребує виконання оптимізації їх кількості.

За умови, що всі елементи ділянки ПЛ мають рівну ймовірність відмови, ймовірність того, що ПЛ знаходиться в стані  $s_i$  складе  $P(s_i) = 1/N = 0,091$ , а вихідна невизначеність ділянки ПЛ становитиме  $H(\pi_j) = \log_2 N = 3,46$  біти.

За допомогою (5) було обчислено значення залишкової ентропії ПЛ  $H(S|\Pi)$  після проведення кожної елементарної перевірки. Для компактності табл. 1, у ній представлено результати розрахунку лише для тих комбінацій діагностичних параметрів, які мають найменше значення ентропії. У випадках, коли набори діагностичних параметрів мають однакові значення ентропії, наприклад,  $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1$  і  $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_8$  до подальшого розгляду приймається той набір, параметри якого найбільш просто отримати та практично реалізувати.

Таблиця 1– Можливі стани ділянки ПЛ

| Параметр контролю                                          | Стани (несправності) |         |         |         |         |         |         |         |         |          |          | $H(S \pi_j)$ ,<br>біт |
|------------------------------------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|-----------------------|
|                                                            | $s_1$                | $s_2$   | $s_3$   | $s_4$   | $s_5$   | $s_6$   | $s_7$   | $s_8$   | $s_9$   | $s_{10}$ | $s_{11}$ |                       |
| $\pi_1$                                                    | 1                    | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 0       | 1       | 1        | 1        | 3,020                 |
| $\pi_2$                                                    | 1                    | 0       | 0       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        | 1        | 2,775                 |
| $\pi_3$                                                    | 1                    | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 0       | 1        | 1        | 3,020                 |
| $\pi_4$                                                    | 1                    | 1       | 1       | 1       | 0       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        | 1        | 3,020                 |
| $\pi_5$                                                    | 1                    | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        | 0        | 3,020                 |
| $\pi_6$                                                    | 0                    | 1       | 0       | 1       | 1       | 1       | 0       | 1       | 1       | 1        | 1        | 2,614                 |
| $\pi_7$                                                    | 1                    | 0       | 1       | 0       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        | 1        | 2,775                 |
| $\pi_8$                                                    | 1                    | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 0        | 1        | 3,020                 |
| $\pi_9$                                                    | 1                    | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        | 0        | 3,020                 |
| $\pi_{10}$                                                 | 1                    | 1       | 0       | 1       | 0       | 0       | 0       | 1       | 1       | 1        | 1        | <b>2,514</b>          |
| $\pi_{11}$                                                 | 1                    | 1       | 0       | 1       | 0       | 0       | 1       | 1       | 1       | 1        | 1        | 2,614                 |
| $\pi_{10} - \pi_6$                                         | 10                   | 11      | 00      | 11      | 01      | 01      | 00      | 11      | 11      | 11       | 11       | 1,774                 |
| $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2$                                 | 101                  | 110     | 000     | 111     | 011     | 011     | 001     | 111     | 111     | 111      | 111      | 1,237                 |
| $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1$                         | 1011                 | 1101    | 0001    | 1111    | 0111    | 0111    | 0011    | 1110    | 1111    | 1111     | 1111     | 0,909                 |
| $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_8$                         | 1011                 | 1101    | 0001    | 1111    | 0111    | 0111    | 0011    | 1111    | 1111    | 1110     | 1111     | 0,909                 |
| $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1 - \pi_3 - \pi_5$         | 101111               | 110111  | 000111  | 111111  | 011111  | 011111  | 001111  | 111011  | 111101  | 111111   | 111110   | 0,364                 |
| $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1 - \pi_3 - \pi_5 - \pi_4$ | 1011111              | 1101111 | 0001111 | 1111110 | 0111111 | 0111111 | 0011111 | 1110111 | 1111011 | 1111111  | 1111101  | 0,182                 |

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз табл. 1 показує, що найменшу залишкову ентропію має набір із семи параметрів:  $\pi_1 - \pi_2 - \pi_3 - \pi_4 - \pi_5 - \pi_6 - \pi_{10}$ . Діагностичні параметри  $\pi_1 - \pi_5, \pi_{10}$  відносяться до оптико-візуальний методу неруйнівного контролю, а  $\pi_6$  – до теплового. На практиці реалізація цих методів здійснюється за допомогою спеціалізованого обладнання. Параметри  $\pi_1 - \pi_5$  визначаються за допомогою цифрової фотокамери з високою роздільною здатністю. Параметр  $\pi_6$  вимірюється за допомогою тепловізора, який дозволяє виявляти аномалії температурних полів ПЛ. Для вимірювання параметра  $\pi_{10}$  застосовується УФ-камера, яка фіксує рівень розрядної активності біля ізоляторів та струмопровідних частин ПЛ. Діагностичне обладнання має значну вагу, тому для його доставки використовуються літаючі платформи промислового класу (квадрокоптери), наприклад, DJI Matrice 350 RTK [18]. Зазвичай такі БпЛА оснащуються гіростабілізованими підвісами для встановлення корисного навантаження. Використання таких підвісів критично важливе для забезпечення високої якості та точності вимірювань [19]. Застосування цієї технології дозволяє компенсувати вібрації та коливання БпЛА під час польоту, що забезпечує стабільність діагностичного обладнання та, як наслідок, підвищує достовірність отриманих даних при проведенні інспекцій повітряних ліній. Крім того, системи гіростабілізації можуть бути інтегрованими з GPS та інерціальними навігаційними системами БпЛА. Це дозволяє реалізувати такі функції, як автоматичне відстеження об'єктів чи точне позиціонування камери відносно наземних орієнтирів, що особливо важливо при інспекціях ліній електропередавання.

Запропонований підхід доцільно використовувати при проведенні техніко-економічного обґрунтування вибору діагностичного обладнання ПЛ, що дозволить оптимізувати процес формування комплексу технічних засобів СТД. Зокрема, він допомагає визначити найбільш інформативні та ефективні діагностичні параметри, які можливо отримати за допомогою обладнання, встановленого на БпЛА.

Розглянутий приклад мінімізації кількості діагностичних параметрів ПЛ не враховує ймовірності різних її станів. За наявності статистичної інформації про відмови ПЛ внаслідок появи експлуатаційних дефектів, доцільно спочатку оцінювати ймовірність появи конкретних груп дефектів ПЛ.

Отже, сучасні технології БпЛА в поєднанні зі штучним інтелектом відкривають нові перспективи для створення комплексних системи дистанційного діагностування повітряних ліній електропередавання. Широкий спектр сенсорів, якими вони можуть бути обладнані, дозволяє збирати значний обсяг даних про стан ПЛ. Застосування СТД ПЛ на базі БпЛА сприятиме своєчасному виявленню та усуненню потенційних несправностей, що, в свою чергу, дозволить суттєво підвищити надійність електропостачання споживачів. Крім того, застосування таких діагностичних систем може значно подовжити термін експлуатації ПЛ за рахунок превентивного обслуговування та своєчасного усунення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

**Висновки.** 1. Встановлено, що істотний знос конструктивних елементів повітряних ліній ОЕС України, посилений впливом кліматичних змін зумовлює зростання кількості їх ушкоджень, що робить належне обслуговування ПЛ пріоритетним завданням для уникнення ризику виникнення значних збитків внаслідок неминучих технологічних порушень у їх роботі.

2. Встановлено, що існуючі системи технічного діагностування ПЛ на базі БпЛА здебільшого орієнтовані на вирішення спеціалізованих завдань для конкретних районів електромереж і не є універсальними, що обмежує їхню адаптацію до різних умов експлуатації та вказує на потребу в розробці більш комплексних систем, здатних охоплювати широкий спектр проблем електромереж.

3. Досліджено, що переважна кількість дефектів конструктивних елементів повітряних ліній проявляється у вигляді різноманітних тріщин, сколів, надломів, обривів, втрати кріпильних елементів, корозії, а решту складають приховані дефекти, такі як ослаблені контактні з'єднання проводів, нульові ізолятори, всі ці дефекти можуть бути виявлені за допомогою дистанційних методів неруйнівного контролю.

4. Визначено, що за прийнятих обмежень для діагностування стану повітряної лінії 110 кВ найбільшу інформативність має група з семи параметрів, до складу якої входять візуальні сигнатури дефектів, температури провідників і контактних з'єднань, а також розрядна активність ізоляторів і струмопровідних частин.

## Список літератури

1. План розвитку системи передачі на 2022-2031 роки. Укренерго, 2021. 422 с.
2. Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В., Захаренко Н. С. Підвищення надійності системи електропостачання за рахунок безпілотних літальних апаратів. *Наукові праці БНТУ*. 2020. №1. С. 1-6.
3. Guan H., Sun X., Su Y., Hu T., Wang H. et al. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2021, 130, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106987>.
4. Muhammad A., Shahpurwala A., Mukhopadhyay S., El-Hag A. H. Autonomous Drone-Based Powerline Insulator Inspection via Deep Learning. In: Silva M., Luis Lima J., Reis L., Sanfeliu A., Tardioli, D. (eds) Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1092. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35990-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35990-4_5).
5. Waleed D., Mukhopadhyay D. S., Tariq U., El-Hag A. H. Drone-Based Ceramic Insulators Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021. Vol. 70. P. 1-12, DOI: 10.1109/TIM.2021.3078538.
6. Li Z., Zhang Y., Wu H., Suzuki S., Namiki A. et al. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sens.* 2023. 15(3). 865 p. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>.
7. Kozlovskiy O., Trushakov D., Rendzinyak S., Korud V. Development of a UAV-based System for Technical Diagnostics of Overhead Power Lines. 24<sup>th</sup> International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering 2023, CPEE 2023*. DOI: 10.1109/CPEE59623.2023.10285318.
8. Правила улаштування електроустановок. Х.: Форт, 2017. 760 с.
9. Правила охорони електричних мереж. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/209-97-%D0%BF#Text>.
10. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Х.: Форт, 2018. 370 с.
11. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007. Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. К.: ГРІФРЕ, 2007. 141 с.
12. Бедерак Я. С., Тарадай В. І. Забезпечення надійної роботи електроустановок споживачів. Х.: Форт, 2020. 170 с.
13. Горобей Р., Чернов В., Удод Е. Діагностування електрообладнання 0,4-750 кВ засобами інфрачервоної техніки / під заг. ред. Е. Удода. К.: КВІЦ, 2007. 374 с.
14. Wang S., Lv F. Liu Y. Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21. No. 4. P. 1697-1704. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004358.
15. Sokol Y. I., Zaporozhets A. O., eds. Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Springer International Publishing, 2021. 157 p.
16. Кутін В. М., Ллюхін М. О., Кутіна М. В. Діагностика електрообладнання. Вінниця: БНТУ, 2013. 161 с.
17. Надійність та діагностика електрообладнання / В. М. Казак, Б. І. Доценко, В. П. Кузьмін та ін. К.: НАУ, 2013. 280 с.
18. Matrice 350 RTK. Specs: веб-сайт. URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs> (дата звернення 30.08.2024).
19. Майданик О. О., Мелешко Є. В., Мацуї А. М., Шимко С. В. Дослідження методів стабілізації відео та будови гіростабілізованих підвісів відеокамер для безпілотних літальних пристроїв. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*: зб. наук. пр. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 6(37). Ч. 2. С. 26-36.

## References

1. *Plan rozvytku systemy peredachi na 2022-2031 roky [Transmission System Development Plan for 2022-2031]*. Ukrenerho [in Ukrainian].
2. Hryb O. H., Karpaliuk I. T., Shvets S. V., Zakharenko N. S. (2020). Pidvyshchennia nadiinosti systemy elektropostachannia za rakhunok bezpilotnykh litalnykh aparativ [*Improving the Reliability of the Power Supply System through Unmanned Aerial Vehicles*]. Naukovi pratsi VNTU. № 1. P. 1-6 [in Ukrainian].
3. Guan H., Sun X., Su Y., Hu T., Wang H. et al. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. (2021). *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 130 p. 106987. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106987> [in English].
4. Muhammad A., Shahpurwala A., Mukhopadhyay S. & El-Hag A. H. (2019). Autonomous Drone-Based Powerline Insulator Inspection via Deep Learning. In: Silva M., Luís Lima J., Reis L., Sanfeliu A., Tardioli, D. (eds) Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1092. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35990-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35990-4_5) [in English].
5. Waleed D., Mukhopadhyay D. S., Tariq U. & El-Hag A. H. (2021). Drone-Based Ceramic Insulators Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 70, pp. 1-12, DOI: 10.1109/TIM.2021.3078538 [in English].
6. Li Z., Zhang Y., Wu H., Suzuki S., Namiki A. et al. (2023). Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sens.* 15(3), 865. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>. [in English].
7. Kozlovskiy, O., Trushakov, D., Rendzinyak, S., Korud, V. (2023). Development of a UAV-based System for Technical Diagnostics of Overhead Power Lines. 24<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2023, DOI: 10.1109/CPEE59623.2023.10285318 [in English].
8. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok.* (2017). [*Rules for Electrical Installations*]. Kharkiv: Fort. [in Ukrainian].
9. *Pravyla okhorony elektrychnykh merezh [Rules for the Protection of Electrical Networks]*. Elektronnyi resurs. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/209-97-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
10. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv.* (2018). [*Rules for the Technical Operation of Electrical Installations of Consumers*]. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
11. SOU-N EE 20.502:2007. Povitriani linii elektroperedavannia napruhoiu 35 kV i vyshche [SOU-N EE 20.502:2007. Overhead Power Transmission Lines with a Voltage of 35 kV and Above]. Kyiv: HRIFRE [in Ukrainian].
12. Bederak Ya. S., Taradai V. I. (2020). *Zabezpechennia nadiinoy roboty elektroustanovok spozhyvachiv [Ensuring Reliable Operation of Consumer Electrical Installations]*. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
13. Horobei R., Chernov V., Udod E. (2007). *Diahnostuvannia elektroobladnannia 0,4-750 kV zasobamy infrachervonoyi tekhniky [Diagnostics of Electrical Equipment from 0.4 to 750 kV Using Infrared Technology]* / pid zah. red. E. Udoda. Kyiv: KVITs [in Ukrainian].
14. Wang S., Lv F., Y. Liu. (2014). Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 21. No. 4. P. 1697-1704. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004358 [in English].
15. Sokol, Yevgen I. & Artur O. Zaporozhets, eds. (2021). *Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*. Springer International Publishing [in English].
16. Kutin, V. M., Iliukhin, M. O., Kutina M. V. (2013). *Diahnostyka elektroobladnannia [Diagnostics of Electrical Equipment]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
17. Kazak V. M., Dotsenko B. I., Kuzmin V. P., Shepeliev Yu. I. & Shevchuk D. O. (2013). *Nadiinist ta diahnostyka elektroobladnannia [Reliability and Diagnostics of Electrical Equipment]*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
18. Matrice 350 RTK. Specs: website. Retrieved from: URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs> [in English].
19. Maidanyk O. O., Meleshko Ye. V., Matsui A. M., Shymko S. V. (2022). Doslidzhennia metodiv stabilizatsii video ta budovy hirostabilizovanykh pidvisiv videokamer dlia bezpilotnykh litalnykh prystroiv [Research of Video Stabilization Methods and of the Construction of Video Camera Gyro-stabilized Suspensions for Drones]. *Tsentralkoukraiynskiyi naukoyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin: Technical sciences.* 6(37). Pr 2. P. 26-36.

**Oleksandr Kozlovskiy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Serhiy Rendzinyak**, Prof., DSc.

*Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine*

## **Justification of Diagnostic Parameters for a Comprehensive UAV-based Remote Diagnostic System for Overhead Power Lines**

The article presents the results of substantiating diagnostic parameters for a multiparametric remote monitoring system of overhead power lines based on the use of an unmanned aerial vehicle (UAV).

Significant wear of the structural elements of overhead power lines (OHL) in the IPS of Ukraine, exacerbated by the impact of climate change, leads to an increase in the number of damages. This makes proper maintenance of OHL a priority task. Existing technical diagnostic systems based UAVs are mainly aimed at solving narrow specialized tasks. Therefore, there is a need to develop more universal and comprehensive systems. The analysis of operational defects in the structural elements of OHL has shown that most of these defects manifest as visible mechanical damages, while others remain hidden. Detection of such defects is possible through remote non-destructive testing methods. Based on typical defects, a list of diagnostic parameters for a 110 kV overhead line was formulated. Considering that OHL elements have the same probability of failure, only those defects that may pose a threat to its operability in the near future were considered. Based on the selected defects and diagnostic parameters, a table of possible states of the OHL was compiled. The selection of the necessary and sufficient group of diagnostic parameters was carried out based on their average informativeness, which characterizes the degree of entropy reduction of the overhead line.

The main key aspects of the study are:

- existing technical diagnostic systems for overhead power lines based on UAVs are mainly focused on solving specialized tasks for specific power grid areas and are not universal. This limits their adaptation to different operating conditions and indicates the need for more comprehensive systems capable of addressing a wide range of power grid issues;

- the majority of defects in the structural elements of overhead power lines appear as various cracks, chips, fractures, breaks, loss of fastening elements, and corrosion, while the remaining defects are hidden, such as weakened wire connections and zero insulators. All these defects can be detected using remote non-destructive testing methods;

- given the accepted limitations, the most informative group for diagnosing the state of an overhead power line consists of seven parameters, including visual signatures of defects, temperatures of conductors and contact connections, as well as discharge activity of insulators and conductive parts.

**overhead power line, operational defect, unmanned aerial vehicle, UAV, information theory, diagnosis, diagnostic parameter**

*Одержано (Received) 08.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.072.2.014.2-413 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.80-91](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.80-91)

С.А. Гудзь, доц., канд. техн. наук

*ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна**e-mail: goods\_s\_a@pstu.edu*

О.Г. Фенко, доц., канд. техн. наук

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна**e-mail: fenko.aleksey@gmail.com*

В.В. Дарієнко, доц., канд. техн. наук, Г.Д. Портнов, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: vvdarienko@gmail.com, budkom999@gmail.com*

## Проектування розкріплених прогонів покриття з урахуванням жорсткості профільованого настилу

Стаття присвячена дослідженню стійкості суцільних прогонів у складі покриття і порівнянню їх ефективності. Надаються практичні рекомендації щодо зниження матеріалоемності прогонних систем за рахунок раціонального вибору типу перерізу. Висновок зроблено на основі геометрично нелінійного аналізу напружено-деформованого стану із урахуванням недосконалостей і жорсткості конструкцій бокового розкріплення. Перевага надається прогонам із прокатних двотаврів, які мають менші ексцентриситети прикладення навантаження та внутрішні зусилля, на відміну від швелерів.

**прогон, відкритий поперечний переріз, втрата стійкості, кручення, розкріплення**

**Постановка проблеми.** Покрівельні прогони являють собою найчастіше однопролітні балки суцільного перерізу, які складають в середньому 10 – 15% від маси будівлі. У будівлях із легкою покрівлею більш раціональним є застосування саме розрізних прогонів покриття. Для нерозрізних схем прогонів необхідно забезпечувати розкріплення як верхнього, так і нижнього поясів згідно з розрахунком на стійкість. За нерозрізної схеми збільшуються опорні реакції від прогонів на середню опору, тому поперечні рами виходять важчими. Донедавна у промислових будівлях для прогонів покриття застосовувався переважно гарячекатаний балковий профіль. Хоча прогони суцільного перерізу важче решітчастих, вони значно простіші у виготовленні та монтажі. Цей тип прогонів часто використовується в поєднанні зі сталевими кроквяними фермами при їх кроці 6 м. Сталеві балки, виготовлені з гарячекатаних профілів, і зараз можуть бути використані замість холодногнутих тонкостінних профілів для покрівельних прогонів.

Прийнято вважати, що при значних ухилах покрівлі швелерний переріз прогону добре працює на косий згин. Прогони з перерізом із швелеру встановлюються стінкою по напрямку скату покриття для врівноваження розподіленого по довжині крутного моменту від скатної складової навантаження крутним моментом від основної переважаючої складової навантаження протилежного напрямку. Проте скатна складова буде сприйматися самим настилом, і кручення все одно виникатиме від основної складової поперечного навантаження.

При великих навантаженнях, які властиві плоским покриттям, переріз прогонів може бути прийнятий із прокатного двотавра. Але з появою холодногнутих прогонів, які за твердженням виробників тонкостінних конструкцій значно легші за рахунок вищої міцності, використання гарячекатаних прогонів стало незвичним. Не зважаючи на очевидні переваги холодногнутих профілів, що полягають у підвищеній точності їхніх розмірів, якості гладкої поверхні, в цілому їм властиві такі недоліки, як досить висока вартість через додаткову обробку металу, наявність залишкових внутрішніх напружень, схильність до непередбаченого випинання внаслідок депланації тонкостінного поперечного перерізу, низька варіативність утворення форм, зокрема складність виготовлення симетричних відкритих перерізів.

Балки відкритого перерізу можуть втратити загальну стійкість, а отже, повинні бути спроектовані з урахуванням цього типу руйнування. Теоретично двотаврова балка, що згинається в площині стінки, являє собою ідеально рівний стрижень, що може відмовити та вичерпати свою тримальну здатність внаслідок втрати загальної стійкості. При досягненні навантаженням критичного значення він починає закручуватись і виходити з площини згину. До втрати стійкості стрижень не закручується та не депланує, а лише згинається. Таку форму втрати стійкості, при якій з'являється якісно новий тип деформації, називають втратою стійкості першого роду.

У випадку косого згину прогонів похилого легкого покриття, а також у результаті наявності ексцентриситетів прикладення навантаження і початкових геометричних недосконалостей, що з'являються внаслідок випадкового утворення дефекту або пошкодження, кручення виникає з самого початку завантаження. Деформації стрижня після втрати стійкості другого роду змінюються лише кількісно. Тому при аналізі прогонів покриття важливо дослідити додаткову появу кручення, розробити методи контролю та мінімізації цього ефекту в умовах експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хоча гарячекатані профілі прогонів більш притаманні покриттям в Україні, при проектуванні слід орієнтуватися на більш розвинуті західні тенденції та визнані в світі концепції. За останні роки достатньо велика увага була приділена дослідженням напружено-деформованого стану та питанням конструювання сталевих прогонів покриття. Численні теоретичні та експериментально-теоретичні дослідження в цій галузі розглядають найчастіше тонкостінні холодногнуті профілі, що мають розкріплення у вигляді сталевих профільованого настилу або сандвіч панелей. Так у працях [1, 2] аналізується вплив навантаження відриву та характеристик з'єднувальних засобів на жорсткість розкріплення прогонів. Поведінка частково розкріплених холодноформованих сталевих прогонів при втраті стійкості досліджується у статті [3]. Наукові праці [4, 5] представляють результати теоретичного та експериментального дослідження швелерних і зед прогонів, що взаємодіють з листовими елементами покриття. Так були отримані та експериментально перевірені прямі залежності для лінійних і кутових переміщень прогонів, що дозволяють визначити для них зусилля і деформації, а також надані практичні висновки. Конструктивна ефективність холодногнутих сталевих прогонів доводиться у публікації [6]. За участі автора даної статті було розвинено модель розрахунку сталевих розкріплених елементів на стійкість при сумісній дії поперечного згину та кручення [7], зокрема в пластичній стадії роботи [8].

Формули для визначення жорсткостей профільованого настилу наведено в нормах EN 1993-1-3 [9], які видають дещо занижене значення зсувної жорсткості, але не вимагають, щоб настил був прикріплений усіма чотирма гранями до опорних конструкцій, а лише двома. Такий спосіб кріплення полегшує процес і зменшує вартість монтажу. Деякі виробники профільованого настилу (Hoesch, Fischer, Arcelor)

розробили свої власні методики визначення зсувної жорсткості, які можуть бути використані тільки для цієї продукції та у випадку кріплення чотирма гранями.

Встановлено, що зсувна жорсткість настилу також залежить від способу його кріплення до балки. З економічних умов профільований настил часто кріплять через хвилю (здебільшого до швелерних прогонів). Якщо профільований настил прикріплюється до балки лише в кожній другій хвилі, то його зсувна жорсткість приймається зменшеною в п'ять разів порівняно з початковою жорсткістю.

Таким чином, не розв'язаною раніше частиною загальної проблеми аналізу та дослідження стану сталевих елементів є визначення взаємодії між формою поперечного перерізу та напруженнями в розкріплених елементах із геометричними недоскональностями. Для точнішого відтворення реальних умов роботи конструкції потрібно вдосконалювати методи моделювання та чисельних розрахунків.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз внутрішніх зусиль і деформацій у розкріплених профільованим настилом прогонах покриття з урахуванням якомога більшої кількості факторів, які мають суттєвий вплив на коефіцієнт використання поперечного перерізу за нормальними напруженнями, що виступає важливим чинником ефективності та матеріалоемності.

Задачею даної наукової праці є підтвердження наступного припущення. Якщо в каркасних будівлях із легкою покрівлею до верхнього поясу сталевому прогону за допомогою самонарізних гвинтів жорстко приєднаний профільований настил, який з'єднаний між собою заклепками у поздовжніх стиках, то він може ефективно перешкоджати закручуванню, боковому вигину і використовуватись для протидії втраті стійкості балки за згинально-крутильною формою.

**Виклад основного матеріалу.** Для детального аналізу напружено-деформованого стану прогону у складі покриття використаємо систему диференціальних рівнянь стійкості, що виражає умови рівноваги, описує поведінку тонкостінного стрижня з урахуванням схеми його деформування та ефектів другого порядку за допомогою просторової моделі. При завантаженні у загальному випадку рівномірно розподіленим поперечним навантаженням у двох площинах, прикладеним із можливими ексцентриситетами, система рівнянь для попередньо викривленої в площині меншої жорсткості балки відкритого поперечного перерізу за умови відсутності початкового кута повороту і початкового прогину балки внаслідок її значної крутильної та згинальної жорсткості в основній площині без урахування жорсткості конструкцій розкріплення має вигляд, де цифри в дужках показують порядок похідної:

$$\begin{cases} (EI_z v^{(2)})^{(2)} + (M_y \vartheta)^{(2)} = q_y; \\ (EI_y w^{(2)})^{(2)} + (M_z \vartheta)^{(2)} = q_z; \\ (EI_\omega \vartheta^{(2)})^{(2)} - (GI_t \vartheta^{(1)})^{(1)} + M_y v_0^{(2)} + M_y v^{(2)} + \\ + M_z w^{(2)} - (M_{rr} \vartheta^{(1)})^{(1)} + q_y y_q \vartheta + q_z z_q \vartheta = m_x, \end{cases} \quad (1)$$

де  $v$ ,  $w$ ,  $\vartheta$  – функції розподілу викривлення, прогину та кута повороту (закручування) балки під навантаженням по довжині стрижня;

$v_0$  – функція розподілу початкового викривлення балки по довжині стрижня;

$E$ ,  $G$  – модулі пружності та зсуву відповідно;

$I_y$ ,  $I_z$ , – моменти інерції перерізу балки відносно горизонтальної осі  $y$  та вертикальної осі  $z$  відповідно;

$I_\omega$  – секторіальний момент інерції перерізу балки;

$I_t$  – момент інерції перерізу балки при вільному крученні;

$M_y, M_z$  – функції згинальних моментів, що діють відносно осей  $y$  і  $z$  відповідно;

$M_{rr}$  – скорочене позначення функції внутрішнього зусилля, що залежить від крутного моменту  $M_x$ ; при відсутності поздовжньої сили  $M_{rr} = M_y r_z - M_z r_y + M_\omega r_\omega$  ( $r_y, r_z$  – полярно-осьові геометричні характеристики перерізу балки; для подвійно симетричного прокатного двотавра  $r_y = r_z = 0$ , для одинарно симетричного прокатного швелера  $r_z = 0$ ;  $M_\omega$  – функція згинально-крутильного біоменту;  $r_\omega$  – секторіально-полярний радіус інерції перерізу балки, при наявності хоча б однієї осі симетрії  $r_\omega = 0$ ).

$q_y, q_z$  – рівномірно розподілені поперечні навантаження, що діють вздовж осей  $y$  і  $z$  відповідно та передаються на балку, зазвичай, через приєднані до верхнього поясу огорожувальні конструкції; при збігові напрямку дії навантаження з напрямком осей знак приймається додатний;

$y_q, z_q$  – координати точки прикладення навантаження відносно центра згину балки; для двотавра при прикладенні рівнодійної сили поперечного навантаження до верхнього поясу по середині стінки  $y_q = 0$ , для швелера, встановленого стінкою по напрямку скату покриття, внаслідок закручування поперечного перерізу навантаження передаватиметься на один край, тоді  $y_q \approx -e$ , де  $e$  – відстань від центра стінки до центра згину;  $z_q = -\frac{h}{2}$  ( $h$  – висота балки);

$m_x$  – рівномірно розподілене крутне навантаження відносно центра згину з урахуванням правила знаків при крученні ( $m_x = q_z y_q - q_y z_q$ ).

Доповнимо систему реактивними зусиллями від наявних конструкцій розкріплення, які будуть пропорційні жорсткостям податливих опор. Тоді в правій частині першого та третього рівнянь системи з'являться додаткові лінійні поперечні та крутні навантаження, що відповідно до теорії опору тонкостінного стрижня в пружному середовищі дорівнюватимуть:

$$q_{ys} = V_s^{(1)} = S(v^{(2)} - z_s g^{(2)}); \quad (2)$$

$$m_{xs} = -c_g g - q_{ys} z_s, \quad (3)$$

де  $S$  – зсувна жорсткість конструкцій розкріплення, що приходить на одну балку;

$z_s$  – ордината точки кріплення приєднаних конструкцій відносно центра згину балки; при ексцентричному кріпленні до верхнього поясу  $z_s = -\frac{h}{2}$ ;

$c_g$  – крутильна жорсткість конструкцій розкріплення.

При зміні згинального моменту по довжині балки, що перебуває в пружному середовищі, система диференціальних рівнянь стійкості тонкостінного стрижня не має замкненого відносно простого розв'язку, оскільки до рівнянь системи входять перемінні коефіцієнти, що робить їх інтегрування не завжди можливим. Однак попередньо було зроблено допущення, що при наявній у типових конструкціях жорсткості профільованого настилу стиснутий пояс прогону стримується від поперечних деформацій. Тоді згинальний момент у площині меншої жорсткості балки буде сприйматися приєднаним листовим полотном покриття. Тому складова третього рівняння, що містить згинальний момент  $M_z$ , порівняно зі згинальним моментом  $M_y$ , буде величиною вищого порядку малості, яка може бути знехтувана. Те саме стосується і внутрішнього зусилля, що залежить від крутного моменту. В цьому ми

можемо пересвідчитися, встановивши як сильно зменшиться згинальний момент  $M_z$  в пружному середовищі порівняно з його початковим значенням у нерозкріпленій балці:

$$M_z = \frac{q_y x^2}{2} - \frac{q_y l}{2} x. \quad (4)$$

Оскільки деформації прогину та викривлення балки тепер незалежні одна від іншої, систему перепишемо з урахуванням прийнятих спрощень без другого рівняння, що описує прогин балки:

$$\begin{cases} (EI_z v^{(2)})^{(2)} + (M_y \vartheta)^{(2)} = q_y + S v^{(2)} - S z_s \vartheta^{(2)}; \\ (EI_\omega \vartheta^{(2)})^{(2)} - (GI_t \vartheta^{(1)})^{(1)} + M_y v_0^{(2)} + M_y v^{(2)} + \\ + q_y y_q \vartheta + q_z z_q \vartheta = m_x - c_g \vartheta - S z_s v^{(2)} + S z_s^2 \vartheta^{(2)}. \end{cases} \quad (5)$$

Знаючи деформації  $v$ ,  $\vartheta$  та похідні від них, можна за допомогою рівнянь системи встановити внутрішні зусилля, необхідні для визначення напружень і перевірки тримальної здатності елемента. Приблизний розв'язок системи диференціальних рівнянь стійкості можна отримати за допомогою заснованого на принципі можливих переміщень Лагранжа методу, що полягає в наступному. Наведемо основні етапи розв'язку системи. Задаємося функціями деформацій викривлення та кута повороту, а також початкової геометричної недосконалості у вигляді напівхвиль синусоїди, що задовольняють граничні умови при шарнірному обпиранні кінців балки відносно лінійних переміщень і кутів повороту. Для точного розрахунку стрижня в пружному середовищі, навіть при симетричному навантаженні, необхідно брати кілька параметрів в розкладеннях ряду. Але два параметри згідно з [8] призводять до заниження значення внутрішніх зусиль при крученні, а саме величини згинально-крутильного бімоменту. Оскільки подальше збільшення кількості параметрів викликає необґрунтовану громіздкість і ускладнює розв'язок, який уже потребує реалізації із застосуванням обчислювальної техніки і відповідного програмного забезпечення, то обмежимося одним параметром. У загальному вигляді кожен з цих функцій  $u(x)$  можна записати і диференціювати таким чином:

$$u = u_A \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right); \quad (6)$$

$$u^{(1)} = u_A \frac{\pi}{l} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right); \quad (7)$$

$$u^{(2)} = -u_A \frac{\pi^2}{l^2} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right); \quad (8)$$

$$(u^{(2)})^{(2)} = u_A \frac{\pi^4}{l^4} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right), \quad (9)$$

де  $u_A$  – амплітуда компоненти деформації та геометричної недосконалості.

Будемо розглядати лише поширену в більшості випадків симетричну балкову схему завантаження, характерну для прогонів покриття, у вигляді рівномірно розподіленого по всій довжині поперечного навантаження. З урахуванням припущення величина згинального моменту по довжині балки відносно осі  $y$  може визначатись за недеформованою схемою:

$$M_y = -\frac{q_z x^2}{2} + \frac{q_z l}{2} x. \quad (10)$$

Підставляючи функції (6) – (10) у систему рівнянь стійкості (5), ми отримаємо вирази, які характеризують деяку систему сил, що перебуває в рівновазі відповідно до її фізичного змісту, тому сума робіт усіх сил на будь-якому можливому безкінечно малому переміщенні дорівнюватиме нулю. Помноживши кожен доданок системи на відповідну функцію безкінечно малого переміщення  $\delta u(x) = \delta u = \delta u_A \sin(\pi x/l)$  згідно з принципом Лагранжа, отримаємо вираз для суми елементарних можливих робіт:

$$\delta W = \delta W_e + \delta W_m + \delta W_q + \delta W_s = 0, \quad (11)$$

де відповідні вирази для роботи після незначних перетворень набудуть вигляду:

$$\delta W_e = \int_0^l EI_z v^{(2)} \delta v^{(2)} dx + \int_0^l EI_\omega \vartheta^{(2)} \delta \vartheta^{(2)} dx + \int_0^l GI_t \vartheta^{(1)} \delta \vartheta^{(1)} dx; \quad (12)$$

$$\delta W_m = \int_0^l M_y \vartheta \delta v^{(2)} dx + \int_0^l M_y v_0^{(2)} \delta \vartheta dx + \int_0^l M_y v^{(2)} \delta \vartheta dx; \quad (13)$$

$$\delta W_q = -\int_0^l q_y \delta v dx + \int_0^l q_y y_q \vartheta \delta \vartheta dx + \int_0^l q_z z_q \vartheta \delta \vartheta dx - \int_0^l m_x \delta \vartheta dx; \quad (14)$$

$$\delta W_s = \int_0^l S v^{(1)} \delta v^{(1)} dx - \int_0^l S z_s \vartheta^{(1)} \delta v^{(1)} dx - \int_0^l S z_s v^{(1)} \delta \vartheta^{(1)} dx + \int_0^l S z_s^2 \vartheta^{(1)} \delta \vartheta^{(1)} dx + \int_0^l c_g \vartheta \delta \vartheta dx. \quad (15)$$

Рівняння суми робіт (11) після взяття інтегралів по всій довжині стрижня і спрощень може бути представлено у вигляді системи однорідних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих амплітудних величин деформацій викривлення та кута повороту, що відшукуються матричним способом за правилом Крамера. Розв'язок системи отримаємо, знайшовши визначник матриці. Інтегрування виконувалось за допомогою системи комп'ютерної алгебри Maxima. Отримані кінцеві формули матричного рівняння суми робіт для визначення невідомих деформацій наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Визначення деформацій викривлення та кута повороту розкріпленого стрижня матричним способом

|                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Матричне рівняння суми робіт: $\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_A \\ \vartheta_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix};$                                                                                  |
| Невідомі деформації: $v_A = \frac{1}{\Delta} (K_{22} P_1 + K_{21} P_2); \quad \vartheta_A = \frac{1}{\Delta} (K_{11} P_2 + K_{12} P_1);$                                                                                                                                             |
| Визначник матриці: $\Delta = K_{11} K_{22} - K_{12} K_{21}.$                                                                                                                                                                                                                         |
| Коефіцієнти системи: $K_{11} = \frac{\pi^2}{l^2} EI_z + S; \quad K_{12} = K_{21} = S z_s + \frac{q_z l^2}{4\pi^2} + \frac{q_z l^2}{12};$<br>$K_{22} = S z_s^2 + \frac{q_y y_q l^2}{\pi^2} + \frac{q_z z_q l^2}{\pi^2} + \frac{\pi^2 EI_\omega}{l^2} + GI_t + \frac{c_g l^2}{\pi^2};$ |
| Вільні члени: $P_1 = \frac{4q_y l^2}{\pi^3}; \quad P_2 = \frac{q_z l^2 v_{0A}}{4\pi^2} + \frac{q_z l^2 v_{0A}}{12} + \frac{4m_x l^2}{\pi^3}.$                                                                                                                                        |

Джерело: розроблено авторами.

Розрахункові згинальні моменти  $M_y$ ,  $M_z$  і розрахунковий згинально-крутильний бімомент  $M_\omega$  будуть визначатись за деформованою схемою:

$$M_y = \frac{q_z l^2}{8} + \left( -\frac{q_y l^2}{8} + S v_A - S z_s \vartheta_A \right) \vartheta_A; \quad (16)$$

$$M_z = -\frac{\pi^2 EI_z v_A}{l^2}; \quad (17)$$

$$M_\omega = \frac{\pi^2 EI_\omega \vartheta_A}{l^2}. \quad (18)$$

Загальний коефіцієнт використання поперечного перерізу в пружній стадії роботи за нормальними напруженнями відповідно до умови стійкості дорівнюватиме алгебраїчній сумі часткових коефіцієнтів використання за напруженнями від розрахункових згинальних моментів і згинально-крутильного бімоменту. Для прогонів покриття із гарячекатаних профілів, що працюють під статичним навантаженням, при врахуванні жорсткості профільованого настилу дозволяється врахування пружно-пластичної роботи матеріалу. Так у програмі CSR-TSV-3plates можливо визначити тримальну здатність поперечних перерізів із трьох пластин у пластичній стадії відповідно до теорії часткових внутрішніх зусиль [8]. Перевірка тримальної здатності поперечного перерізу може бути виконана також і за повною теорією балок із застосуванням методу часткових внутрішніх зусиль з більшою кількістю параметрів у розкладеннях ряду в програмі FE-Stability для проектування однопролітних або нерозрізних балкових елементів, завантажених у плоскій чи об'ємній формі згину, з постійним поперечним перерізом, що враховує осьові деформації, вигин відносно обох осей, кручення та депланацію, жорсткості континуальних і дискретних конструкцій розкріплення, а також початкові геометричні недосконалості. Вказані програми вільно поширюються на сайті [10] від RUBSTANL для використання в навчальних цілях у вигляді файлів Microsoft Excel з улаштованими макросами VBA.

Оцінимо точність наближеного розв'язку, провівши порівняння результатів, отриманих аналітично згідно з вище наведеною методикою, шляхом чисельного розв'язку відповідно до повної теорії балок і даних 3D моделювання методом скінченних елементів у програмі KESZ ConSteel. Результати порівняння значень внутрішніх зусиль, деформацій і коефіцієнта використання зведемо до табл. 2 для швелерної балки 20У та до табл. 3 для двотаврової балки 18. Дані профілі мають приблизно однакову площу поперечного перерізу (23,4 см<sup>2</sup>). Проліт балок становив 6 м, а кут нахилу покрівлі приймався рівним 3, 9 і 15 °.

Таблиця 2 – Порівняння значень отриманих внутрішніх зусиль, деформацій і коефіцієнта використання для розрахованої різними методами швелерної балки 20У

| Метод розрахунку розкріпленого прогону | $\alpha$ , °, кріплення | $M_y$ , кНсм | $M_z$ , кНсм / $v$ , мм | $M_\omega$ , кНсм <sup>2</sup> / $\vartheta$ , ° | Використання, $el$ / $pl$ , % |
|----------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Наближений розв'язок                   | 3, у кожній хвилі       | 3 675        | -85,6 / 1,34            | -723 / -8,47                                     | 117,0 / 98,0                  |
| Повна теорія балок                     |                         | 3 702        | -84,0 / 1,52            | -596 / -9,22                                     | - / 99,3                      |
| Моделювання МСЕ                        |                         | 3 651        | -56,0 / 1,29            | -400 / -7,80                                     | - / 97,4                      |
| Спрощена пропозиція                    |                         | 3 595        | (-189,0) / -            | -                                                | 103,7 / -                     |
| Наближений розв'язок                   | 3, через хвилю          | 3 708        | -80,4 / 1,26            | -872 / -10,2                                     | 119,6 / 96,2                  |
| Повна теорія балок                     |                         | 3 755        | -64,0 / 1,42            | -807 / -11,6                                     | - / 97,0                      |
| Моделювання МСЕ                        |                         | 3 676        | -42,0 / 1,24            | -530 / -9,78                                     | - / 98,2                      |
| Спрощена пропозиція                    |                         | 3 595        | (-189,0) / -            | -                                                | 103,7 / -                     |

|                      |                          |       |               |              |              |
|----------------------|--------------------------|-------|---------------|--------------|--------------|
| Наближений розв'язок | 9,<br>у кожній<br>хвилі  | 3 631 | -89,0 / 1,39  | -710 / -8,31 | 115,9 / 97,4 |
| Повна теорія балок   |                          | 3 659 | -88,0 / 1,57  | -590 / -9,10 | - / 98,5     |
| Моделювання МСЕ      |                          | 3 607 | -58,0 / 1,32  | -390 / -7,51 | - / 96,5     |
| Спрощена пропозиція  |                          | 3 556 | (-562,5) / -  | -            | 102,6 / -    |
| Наближений розв'язок | 9,<br>через<br>хвилю     | 3 649 | -97,4 / 1,53  | -789 / -9,24 | 118,1 / 97,9 |
| Повна теорія балок   |                          | 3 695 | -84,0 / 1,68  | -752 / -10,7 | - / 97,7     |
| Моделювання МСЕ      |                          | 3 620 | -59,0 / 1,47  | -470 / -8,58 | - / 97,7     |
| Спрощена пропозиція  |                          | 3 556 | (-562,5) / -  | -            | 102,6 / -    |
| Наближений розв'язок | 15,<br>у кожній<br>хвилі | 3 546 | -91,7 / 1,44  | -691 / -8,09 | 113,5 / 95,7 |
| Повна теорія балок   |                          | 3 577 | -92,0 / 1,61  | -581 / -8,90 | - / 96,8     |
| Моделювання МСЕ      |                          | 3 537 | -67,0 / 1,48  | -420 / -8,05 | - / 96,1     |
| Спрощена пропозиція  |                          | 3 477 | (-931,5) / -  | -            | 100,4 / -    |
| Наближений розв'язок | 15,<br>через<br>хвилю    | 3 551 | -113,6 / 1,78 | -699 / -8,19 | 115,5 / 98,5 |
| Повна теорія балок   |                          | 3 596 | -105,0 / 1,93 | -690 / -9,71 | - / 97,4     |
| Моделювання МСЕ      |                          | 3 529 | -74,0 / 1,69  | -410 / -7,35 | - / 96,4     |
| Спрощена пропозиція  |                          | 3 477 | (-931,5) / -  | -            | 100,4 / -    |

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Порівняння значень отриманих внутрішніх зусиль, деформацій і коефіцієнта використання для розрахованої різними методами двотаврової балки 18

| Метод розрахунку розкріпленого прогону | $\alpha$ , °,<br>кріплення | $M_y$ ,<br>кНсм | $M_z$ , кНсм<br>/ $v$ , мм | $M_\omega$ , кНсм <sup>2</sup><br>/ $\vartheta$ , ° | Використання,<br>$el / pl$ , % |
|----------------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Наближений розв'язок                   | 3,<br>у кожній<br>хвилі    | 3 601           | 13,8 / -0,30               | 146 / 2,42                                          | 111,7 / 95,1                   |
| Повна теорія балок                     |                            | 3 609           | 1,00 / -0,14               | 228 / 3,48                                          | - / 93,6                       |
| Моделювання МСЕ                        |                            | 3 604           | 10,0 / -0,31               | 110 / 2,44                                          | - / 93,5                       |
| Спрощена пропозиція                    |                            | 3 595           | (-189,0) / -               | -                                                   | 99,5 / -                       |
| Наближений розв'язок                   | 3,<br>через<br>хвилю       | 3 607           | 6,04 / -0,13               | 208 / 3,46                                          | 111,7 / 95,7                   |
| Повна теорія балок                     |                            | 3 602           | 14,0 / -0,31               | 151 / 2,40                                          | - / 93,0                       |
| Моделювання МСЕ                        |                            | 3 608           | 10,0 / -0,14               | 160 / 3,51                                          | - / 93,0                       |
| Спрощена пропозиція                    |                            | 3 595           | (-189,0) / -               | -                                                   | 99,5 / -                       |
| Наближений розв'язок                   | 9,<br>у кожній<br>хвилі    | 3 563           | 11,2 / -0,24               | 155 / 2,57                                          | 110,2 / 94,2                   |
| Повна теорія балок                     |                            | 3 562           | 11,0 / -0,25               | 157 / 2,53                                          | - / 92,0                       |
| Моделювання МСЕ                        |                            | 3 565           | 9,00 / -0,30               | 120 / 2,87                                          | - / 92,4                       |
| Спрощена пропозиція                    |                            | 3 556           | (-562,5) / -               | -                                                   | 98,5 / -                       |
| Наближений розв'язок                   | 9,<br>через<br>хвилю       | 3 575           | -6,92 / 0,15               | 267 / 4,44                                          | 112,5 / 95,3                   |
| Повна теорія балок                     |                            | 3 575           | -14,0 / 0,13               | 277 / 4,38                                          | - / 93,0                       |
| Моделювання МСЕ                        |                            | 3 571           | -12,0 / 0,13               | 190 / 4,40                                          | - / 92,8                       |
| Спрощена пропозиція                    |                            | 3 556           | (-562,5) / -               | -                                                   | 98,5 / -                       |
| Наближений розв'язок                   | 15,<br>у кожній<br>хвилі   | 3 486           | 8,45 / -0,18               | 162 / 2,69                                          | 107,5 / 92,2                   |
| Повна теорія балок                     |                            | 3 486           | 8,00 / -0,19               | 162 / 2,63                                          | - / 90,1                       |
| Моделювання МСЕ                        |                            | 3 487           | 6,00 / -0,20               | 110 / 2,65                                          | - / 89,8                       |
| Спрощена пропозиція                    |                            | 3 477           | (-931,5) / -               | -                                                   | 96,3 / -                       |
| Наближений розв'язок                   | 15,<br>через<br>хвилю      | 3 504           | -19,8 / 0,42               | 321 / 5,33                                          | 114,8 / 93,8                   |
| Повна теорія балок                     |                            | 3 505           | -29,0 / 0,40               | 322 / 5,21                                          | - / 91,5                       |
| Моделювання МСЕ                        |                            | 3 499           | -24,0 / 0,41               | 220 / 5,19                                          | - / 91,7                       |
| Спрощена пропозиція                    |                            | 3 477           | (-931,5) / -               | -                                                   | 96,3 / -                       |

Джерело: розроблено авторами.

Секторіальний момент інерції та момент інерції при вільному крученні для поперечних перерізів вказаних балок вираховувались згідно з рекомендаціями додатку К (табл. К.1) ДБН В.2.6-198:2014 [11]. Зсувна і крутильна жорсткості розкріплення у вигляді профільованого настилу вираховувалися усереднено для забезпечення мінімально можливого рівня тримальної здатності за консервативною і альтернативною формулою відповідно до розділу 10 EN 1993-1-3 [9]. Висота і товщина трапецієподібного профілю у розрахункових формулах приймалися відповідно 100 і 0,75 мм. Кількість кріплень на 1 м довжини прогону приймалася рівною 4 при встановленні самонарізних гвинтів у кожній хвилі настилу і 2 при встановленні через одну хвилю настилу, що відповідає його стандартним розмірам.

Загальне вертикальне навантаження на балки складало 8 кН/м. Модуль пружності та границя текучості сталі приймалися постійними ( $E = 206\,000$  МПа,  $R_y = f_y = 240$  МПа для сталі С245). Величина початкового викривлення дорівнювала кривизні прокатних профілів відповідно до сортаменту – 1,2 см (0,2 % від довжини  $l$ ). Несприятливий напрямок викривлення приймався для швелерів спрямованим уверх по схилу покрівлі, а для двотаврів униз по схилу, що в обох випадках збільшує невідповідне крутне навантаження на профіль. Довжина області зсуву складалася з чотирьох кроків покрівельного посиленого профільованого настилу із горизонтальною проекцією 3 м. При цьому достатня крутильна жорсткість згідно з європейським підходом не забезпечується через відсутність зв'язаної осі обертання стрижня.

Розрахунки показали, що при розкріпленні прогонів згинальний момент у площині найменшої жорсткості суттєво зменшується (для швелера при куті нахилу покрівлі  $3^\circ$  – більш ніж в 2 рази, при  $9^\circ$  – більш ніж в 5 раз, при  $15^\circ$  – більш ніж в 8 раз, для двотавра при куті нахилу покрівлі  $3^\circ$  – більш ніж в 13 раз, при  $9^\circ$  – більш ніж в 50 раз, при  $15^\circ$  – більш ніж в 45 раз) і його вплив на їхній загальний напружено-деформований стан практично нівелюється, навіть при кріпленні профільованого настилу через хвилю. Проте у швелерів із таким кріпленням і кутом нахилу до  $8^\circ$  спостерігається нижчий коефіцієнт використання. Тому в такому випадку настил раціонально кріпити до прогону через хвилю. Комбінація менших величин внутрішніх зусиль у швелерів може призвести до непропорційного зростання коефіцієнта використання, що свідчить про розвантажувальну дію згинально-крутильного бімоменту на загальний напружено-деформований стан швелерних профілів.

Двотаври краще поведуть себе при кріпленні без пропусків, що певною мірою позитивно впливає на вагу покрівлі, однак і позначається на вартості її монтажу. Так у пружній стадії нормальні напруження для двотавра 18 при однаковому навантаженні виявились дещо нижчими, ніж у швелера 20У (на 4,6 – 5,4 % пропорційно зростанню кута нахилу покрівлі). При врахуванні розвитку обмежених пластичних деформацій коефіцієнт використання у двотавра теж відчутно менший (на 3,0 – 3,7 % відповідно), ніж у швелера з дещо вищими геометричними характеристиками опору згину (в основній площині на 6,4 %, у площині скату на 20,5 %) та обмеженому крученню (при депланації на 12,6 %) за рахунок менших внутрішніх зусиль. Для двотаврів кріплення профільованого настилу в кожній хвилі дає відчутний ефект щодо підвищення крутильної жорсткості прогону, для швелерів цей вплив незначний, що обумовлено розвантажувальною дією скатної складової навантаження, яка більше компенсує крутний момент від основного навантаження.

Порівняльний аналіз проводився з метою запропонувати спрощений варіант практичного проектування розкріплених профільованим настилом прогонів покриття. Пропозиція полягає в можливості виконання нормативного розрахунку на дію тільки основної складової навантаження, але при цьому враховувати пружно-пластичну

роботу матеріалу не слід, адже цей резерв тримальної здатності вичерпується за рахунок появи неврахованих додаткових напружень від викривлення та закручування поперечного перерізу. Коефіцієнт умов роботи при цьому рекомендується у запас приймати для швелерів  $\gamma_c = 0,95$ . Для двотаврів умови роботи більш сприятливі, тому видається можливим підвищити коефіцієнт до  $\gamma_c = 1,05$ . Втім, це значення є меншим від нормативно встановленого на рівні 1,10. Запропоновані коефіцієнти умов роботи підібрані таким чином, щоб різниця між коефіцієнтами використання при наближеному розв'язку, який підтверджується даними моделювання, і коефіцієнтами використання, визначеними відповідно до запропонованої методики з їх урахуванням, була завжди спрямована у бік підвищеної безпеки конструкції при спрощеному розрахунку.

**Висновки.** Різнобічний аналіз напружено-деформованого стану досліджуваних тримальних елементів покриття на основі повної теорії балок і просторової моделі деформування, що добре узгоджуються між собою, дозволяє зробити такі висновки:

1. Підтверджено припущення про те, що при розкріпленні прогонів покриття профільованим настилом їх можна спрощено розраховувати в пружній стадії лише на основне навантаження в площині більшої жорсткості без влаштування тяжів;

2. Для посилення безпеки у спрощеному розрахунку запропоновано нові значення коефіцієнту умов роботи розкріплених прогонів та обґрунтовано диференціальний підхід щодо їх встановлення залежно від форми поперечного перерізу;

3. Встановлено, що скатна складова навантаження при типових ухилах покрівлі не більше  $15^\circ$  значною мірою сприймається самою обшивкою, а її значення несуттєве і може бути знехтуване порівняно з дією переважаючої складової навантаження в основній площині згину;

4. Виявлено, що загальна стійкість прогонів забезпечується елементами кріплення настилу до прогонів, однак з'єднувальні засоби потребують додаткового спеціального розрахунку при цьому, методика якого для гарячекатаних профілів все ще залишається недостатньо апробованою і виступає предметом для подальших досліджень;

5. Доведено, що згинально-крутильний бімомент суттєво залежить не тільки від навантаження, його ексцентриситету, пружної згинально-крутильної константи перерізу і прольоту балки, як це початково прийнято в теорії тонкостінних стрижнів без урахування опору пружного середовища, але також і від жорсткості приєднаних до балки огорожувальних конструкцій.

## Список літератури

1. Balázs I., Melcher J. Influence of Uplift Load on Torsional Restraint Provided to Steel Thin-Walled Purlins by Sandwich Panels. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 190. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.304>
2. Gajdzicki M., Goczek J. Influence of sheet-to-purlin fastener properties on the rotational restraint of cold-formed Z-purlins. *International Journal of Steel Structures*. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 711–721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6025-5>
3. Ren C., Zhao X., Chen Y. Buckling behaviour of partially restrained cold-formed steel zed purlins subjected to transverse distributed uplift loading. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 114. P. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.048>
4. Gosowski B., Kubica E., Rykaluk K. Analysis of laterally restrained cold-formed C-shape purlins according to Vlasov theory. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 15, no. 2. P. 456–468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.06.001>
5. GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting / C. Basaglia et al. *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 72. P. 217–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.06.005>

6. Cucu V., Constantin D., Buliga D.-I. Structural Efficiency Of Cold-Formed Steel Purlins. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*. 2015. Vol. 21, no. 3. P. 809–814. DOI: <https://doi.org/10.1515/kbo-2015-0137>
7. Гудзь С.А. Розвинена модель розрахунку сталевих розкріплених елементів на стійкість при сумісній дії поперечного згину та кручення / С.А. Гудзь, Г.М. Гасій, В.В. Дарієнко // *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: Збірник наукових праць*. Одеса: ОДАБА, 2020. вип. 24. С. 43 – 52. DOI: <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2020-24-43-52>
8. Hudz Serhii. Plastic bearing capacity of the steel element cross-section by internal forces combination and restraint / Hudz Serhii, Gasii Grygorii, Hasenko Anton, Darienko Viktor // *Зб. наук. праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво*. Вип. 2 (53). Полтава: ПолтНТУ, 2019. С. 73 – 78. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1893>
9. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: CEN, 2006. 130 p. <https://www.stahlbau.ruhr-uni-bochum.de/sb/service/rubsteeltools.html.en>
10. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування / Остаточна редакція. Видання офіційне. Надано чинності з 1 січня 2015 р. К.: Мінрегіонбуд України, 2014. 199 с.

## References

1. Balázs I., Melcher J. (2017) Influence of Uplift Load on Torsional Restraint Provided to Steel Thin-Walled Purlins by Sandwich Panels. *Procedia Engineering*. Vol. 190. P. 35–42. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.304>
2. Gajdzicki M., Goczek J. (2017) Influence of sheet-to-purlin fastener properties on the rotational restraint of cold-formed Z-purlins. *International Journal of Steel Structures*. Vol. 17, no. 2. P. 711–721. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6025-5>
3. Ren C., Zhao X., Chen Y. (2016) Buckling behaviour of partially restrained cold-formed steel zed purlins subjected to transverse distributed uplift loading. *Engineering Structures*. Vol. 114. P. 14–24. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.048>
4. Gosowski B., Kubica E., Rykaluk K. Analysis of laterally restrained cold-formed C-shape purlins according to Vlasov theory. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 15, no. 2. P. 456–468. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.06.001>
5. GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting / C. Basaglia et al. *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 72. P. 217–229. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.06.005>
6. Cucu V., Constantin D., Buliga D.-I. Structural Efficiency Of Cold-Formed Steel Purlins. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*. 2015. Vol. 21, no. 3. P. 809–814. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.1515/kbo-2015-0137>
7. Hudz S.A. Rozvynena model' rozrakhunku stalevykh rozkriplenykh elementiv na stiykist' pry sumisniy diyi poperechnoho z-hynu ta kruchennya [A developed model for calculating the stability of unfastened steel elements under the combined action of transverse bending and torsion] / S.A. Hudz, H.M. Gasii, V.V. Darienko // *Suchasni budivel'ni konstruktsiyi z metalu ta derevyny: Zbirnyk naukovykh prats' [Modern structures of metal and wood: Collection of scientific papers]*. – Odessa: ODABA, 2020. Issue. 24. P. 43 – 52. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2020-24-43-52>
8. Hudz Serhii. Plastic bearing capacity of the steel element cross-section by internal forces combination and restraint / Hudz Serhii, Gasii Grygorii, Hasenko Anton, Darienko Viktor // *Зб. наук. праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво [Collection of scientific work. Series: industrial engineering, construction]*. Vol. 2 (53). Poltava: PoltNTU, 2019. P. 73 – 78. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1893>
9. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: CEN, 2006. 130 p. [in English]. <https://www.stahlbau.ruhr-uni-bochum.de/sb/service/rubsteeltools.html.en>
10. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування / Остаточна редакція. Видання офіційне. [Structures of buildings and structures. Steel structures. Design standards / Final version. The publication is official]. Entered into force on January 1, 2015. К.: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2014. 199 p. [in Ukrainian].

**Serhii Hudz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine*

**Oleksii Fenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine*

**Viktor Dariienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Hennadii Portnov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

## **Design of Restrained Roof Purlins, Taking Into Account the Stiffness of the Profiled deck**

The purpose of the study is to analyse internal forces and deformations in the roof purlins restrained by profiled decking, taking into account as many factors as possible that have a significant impact on the cross-sectional utilisation factor in terms of normal stresses, which is an important factor in efficiency and material consumption.

The following assumption was confirmed in this research paper. If a profiled flooring is rigidly attached to the upper flange of a steel purlin in light-roofed frame buildings using self-tapping screws and is interconnected by rivets at the longitudinal joints, it can effectively prevent torsion and lateral bending and be used to counteract the lateral-torsional buckling of the beam. The peculiarities of checking the stability of continuous purlins as part of a roof were investigated and the effectiveness of open cross-sections of hot-rolled profiles was compared on this basis. Practical recommendations for reducing the material consumption of purlin systems by rationally selecting the type of cross-section are given. The conclusion is made on the basis of a geometrically nonlinear analysis of the stress-strain state in accordance with the full theory of beams, taking into account imperfections and stiffness of lateral bracing structures. Preference is given to purlins made of rolled I-beams, which, due to their symmetry, have smaller eccentricities of load application and internal forces by restraint, unlike channels.

The analysis of the stress-strain state based on the full theory of beams and the spatial deformation model, which are in good agreement with each other, allows us to confirm the assumption that when roof purlins are restrained by profiled decking, they can be simplified in the elastic stage only for the main load in the plane of greater stiffness without the use of weights. The pitched component of the load at typical roof pitches of no more than 15° will be largely absorbed by the sheathing itself, and its value is insignificant and can be neglected in comparison with the effect of the prevailing load component in the main bending plane.

**purlin, open cross-section, buckling, torsion, restraint**

*Одержано (Received) 12.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 625.7/.8**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.91-101](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.91-101)

**М.В.Гаркуша**, доц., канд. техн. наук

*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

*e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua*

## **Застосування гідроізоляційних покриттів для захисту від корозії дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій**

Дорожні водопропускні труби експлуатуються в складних умовах, які спричиняють розвиток корозійного впливу на метал конструкції, а сам метал потребує належного захисту для забезпечення надійності та довговічності споруди в цілому. Щоб забезпечити відповідність вимогам проектного терміну служби, сталеву конструкцію захищають антикорозійним покриттям. В роботі розглянуто різноманітні захисні покриття для підвищення довговічності дорожніх водопропускних від впливу корозії.

**гідроізоляція, довговічність, дорожня водопропускна труба, захисні покриття, корозія**

© М.В. Гаркуша, 2024

**Постановка проблеми.** Дорожні водопропускні труби з металевих гофрованих конструкцій (МГК) працюють у складних умовах, які спричинюють передчасний вихід їх з експлуатації, не забезпечуючи проєктний термін служби, та можуть спричинити до руйнування всієї конструкції дорожнього одягу. Одним із шляхів підвищення довговічності дорожніх водопропускних споруд з МГК є застосування ефективних захисних покриттів від корозії. Отже, проведення даного дослідження для визначення різновидів захисних покриттів та їх ефективність роботи в різних середовищах є актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Покриття, що використовуються на дорожніх водопропускних трубах, можна розділити на дві основні категорії, тобто металеві та бар'єрні. Металеві покриття призначені для створення стійкої до корозії та стирання поверхні та/або для захисту основного металу, діючи як анод у гальванічному елементі (катодний захист). Не всі металеві покриття пропонують жертвний захист основного металу. Наприклад, хромові покриття є катодними у відношенні до сталі, жертвними покриттями є цинк, алюміній або алюміній-цинк на сталі, а також алюмінієве покриття.

Бар'єрні покриття використовуються для запобігання контакту між матеріалом, що захищається, і навколишнім середовищем. Органічні покриття часто ефективно використовуються в поєднанні з тимчасовими покриттями. Бар'єрні покриття, які використовуються на дорожніх водопропускних трубах, включають органічні покриття (асфальтобетонні покриття, бітуми, мастики), епоксидні та тонкоплівкові полімерні покриття. Інші типи покриттів, такі як пасивуючі конверсійні покриття та інгібіторні покриття, не використовуються на дорожніх водопропускних трубах з МГК.

Існує три основні умови навколишнього середовища, які впливають на довговічність дорожніх водопропускних труб з МГК, та які слід враховувати, визначаючи, які матеріали будуть довговічними для застосування, до цих умов відносяться: ґрунтові, водні та антропогенні впливи [1].

Дорожні водопропускні труби з МГК працюють у різноманітних умови навколишнього середовища залежно від пори року та місця розташування: від пустельних умов до суворих північних територіях, до областей з високою вологістю [2]. Оцинкована сталь підходить для частини цих ґрунтів і вод, але коли електрохімічні або стиральні властивості ґрунту/води перевищують ефективний діапазон оцинкованої сталі, необхідні альтернативні покриття або матеріали [3].

У той час як природне середовище створює свої власні ускладнення, антропогенне навантаження протижелезних солей є значним фактором раннього псування конструкційної сталі (рис.1) [4]. Протижелезні солі, що застосовуються для зменшення зледеніння дорожнього покриття, можуть накопичуватися в дорожніх стоках, снігу і узбіччях доріг, та зрештою потрапити до водних шляхів та/або просочування крізь ґрунт до дорожньої водопропускної труби з МГК. У регіонах з інтенсивним використанням солі для протижелезної обробки накопичення продуктів проти зледеніння може призвести до утворення хлоридів у ґрунті або воді, вміст до концентрацій, вищих за початково враховані [4]. Тому є необхідність застосування додаткових захисних покриттів.



Рисунок 1 – Наслідки впливу корозії на дорожню водопропускну трубу з МГК  
Джерело: на підставі [5]

В Україні згідно з ВБН В.2.3-218-198 [6] додатковий захист металевих листів від корозії потрібно призначати на основі даних про корозійну активність (агресивність) ґрунтів основи, насипу та води, що протікає через споруду, а типи додаткового антикорозійного покриття МГК наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Тип додаткового антикорозійного покриття МГК

| Загальний показник ступені агресивності ґрунту та води | Тип додаткового антикорозійного покриття поверхні         |                                                                    |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                                                        | внутрішній                                                | зовнішній                                                          |
| Слабо-агресивна                                        | Бетонний лоток                                            | Ґрунтовка, мастика бітумно-гумова                                  |
| Середньо-агресивна                                     | Ґрунтовка, мастика бітумно-гумова: асфальтобетонний лоток | Ґрунтовка, мастика бітумно-гумова, бітумно-мінеральна (бітуміноль) |

Джерело: на підставі [6]

На сьогоднішній день, наймасовішим захистом від корозії дорожніх водопропускних труб з МГК є використання оцинкування та застосовується в середовищах з помірною корозією. Покриття може служити як методом бар'єрного, так і гальванічного захисту.

Оскільки індустрія вчилася на своїх успіхах і невдачах, були розроблені альтернативні покриття, щоб використовувати дорожні водопропускні труби з МГК в середовищах, де оцинковане покриття не відповідає вимогам експлуатації. Альтернативні рішення для покриття, які використовувалися в минулому або зараз використовуються [2]:

- металеві покриття (оцинковані, алюміновані, алюміновано-оцинковані);
- полімерні покриття;
- епоксидні покриття;
- покриття на основі органічних в'язучих речовин;
- покриття із застосуванням азбесту.

Більшість покриттів мають проблеми з довговічністю в умовах абразивного та екстремального корозійного впливу.

Умови роботи найпоширеніших покриттів наведено на рис. 2.

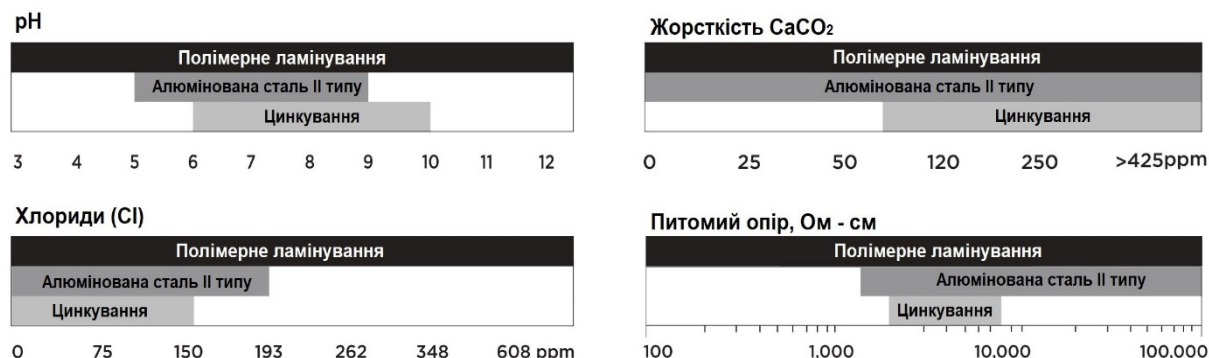


Рисунок 2 – Оптимальний діапазон роботи різних типів покриттів

Джерело: на підставі [7]

Дослідження, проведене Вроцлавським науково-технічним університетом у Польщі, показало, що хоча корозія нижньої частини труби збільшує деформацію у верхній частині труби, вона не послаблює її настільки, щоб спричинити поломку, навіть якщо 48 % нижньої частини труби водопропускна труба піддалася корозії, однак під час засипки це навантаження значно збільшується [8].

#### Виклад основного матеріалу.

**Застосування оцинкованого покриття.** Оцинковане покриття дорожніх водопропускних труб з МГК є найпоширенішим видом покриття. Оцинкування сталевих водопропускних труб вперше було використано в 1907 році для підвищення корозійної стійкості гофрованих сталевих труб. Незважаючи на те, що даний тип покриття широко використовується, цей тип водопропускної труби не слід встановлювати в сильно кислотних середовищах або абразивних ділянках [9].

В роботі [10] стверджується, що обмеження мають бути в діапазоні pH від 6 до 10 і мінімальним питомим опором 3000 Ом·см для максимального терміну служби. В дослідженні [9] стверджується, що цинкове покриття в ґрунті з pH 10 було повністю роз'їденою, але гофрована сталева труба не піддавалася корозії. Дослідження служби оцинкована сталеві водопропускної труби після 8 років, яка була встановлена в ґрунті, що складається з мулу та глини в, була загалом у хорошому стані з помірною іржею та легкими ямками. Було відзначено, що стирання від дрібного гравію викликає занепокоєння, щодо якості покриття [16].

В роботі зазначено, що залізобетон набагато кращий, якщо врахувати середній термін служби його ґрунті [11].

Довідник із сталевих дренажних і дорожніх виробів показує, що інверт (нижня внутрішня частина труби, яка піддається впливу стоків) є частиною труби, яка найбільш сприйнятлива до корозії. Інвертна корозія відбувається швидко, коли значення pH нижче 4,5, але pH ґрунту або води від 6 до 9,5 є загальновизнаним діапазоном для дорожніх водопропускних труб з МГК [9]. Стічні води впливають на швидкість корозії, зменшуючи товщину захисного шару. Розчинені солі у стічних водах можуть посилювати або зменшувати швидкість корозії. Солі, які іонізуються на трубі, зменшують питомий опір, тим самим збільшуючи швидкість корозії. З іншого боку, розчинені солі можуть знизити розчинність кисню, що зменшує корозійну активність стоків [12].

В роботі [13] зазначено, що було проведено дослідження водопропускних труб з оцинкованої сталі без додаткового покриття шляхом удару. Дослідження проводилося за рахунок механічних ударів по трубі киркою та оцінкою кількості втрати металу. Початкові дослідження алюмінієвих водопропускних труб показали, що якщо втрачається будь-який метал, то втрата металу відбуватиметься рівномірно в тій самій географічній зоні, що й оцинкована сталь. Хоча втрати металу на оцинкованій сталі не виявилися критичними. Було помічено й інші спостереження, що якщо дві водопропускні труби розташовувати поруч у руслі потоку, одна завжди несе більшу частину води. Інше доречне спостереження полягало в тому, що показники втрати металу, як правило, були вищими в південній частині штату, це може бути пов'язано з кількістю дощів, які випали лише в цьому році, і структурні пластинчасті водопропускні труби, як правило, мають нижчі показники втрати металу, ніж збірні труби, хоча відмінності невеликі, це варто враховувати. Такі спостереження є доречними під час розгляду питання про те, як слід розміщувати та робити водопропускні труби, щоб уникнути вищої швидкості корозії.

Металеві гофровані конструкції з оцинкованим покриттям добре працюють у неабразивній, жорсткій та неагресивній ґрунтовій воді, тоді як полімерні покриття добре працюють у цих умовах, а також у насиченій сіллю м'якій воді та помірно абразивному середовищі. Дослідження, проведене на початку 2000-х Хенслі та Перрі [14], підтверджує це шляхом проведення перевірок кількох водопропускних труб у різних середовищах. Дослідження зафіксувало умови навколишнього середовища та спостережувану продуктивність у порівняльному дослідженні.

Результати дослідження показують, що в місцях, де переважає вапняк (карбонат кальцію), процес корозії сповільнюється через утворений захисний шар, тоді як у місцях, де переважають солі, спостерігається швидке погіршення [15]. Дослідження показали, що збереження водопропускних труб сухими, особливо на кислих ґрунтах, означає тривалий термін служби [15].

У багатьох державах по-різному розглядаються конкретні випадки визначення факторів корозії. Даний тип покриттів розрахований терміном експлуатації не менше ніж 50 років.

**Алюмінована сталь II типу.** Дорожні водопропускні труби з МГК, що покриті алюмінованою сталлю типу 2 стійкі до корозії, та мають міцну і довговічну захисну функцію. Виготовляються зі сталеві рулонів, що покриті гарячим зануренням рівномірної товщини з обох сторін. Здатні експлуатуватися в м'якій воді, кислих та солоних умовах в порівнянні з оцинкованою сталлю [7].

Даний тип покриттів розрахований терміном експлуатації до 75 років, труби з даним покриттям можуть бути за терміном експлуатування альтернативою залізобетонним трубам.

**Застосування полімерного покриття.** Найпоширенішими видами покриття є полімерний ламінований захист та термопластична полімерна система. Полімерне ламіноване захисне покриття — це верхнє покриття з етиленакрилової кислоти (ЕАА — Ethylene Acrylic Acid), яке термічно ламінований поверх оцинкованого шару з обох сторін дорожньої водопропускної труби з МГК, прикріплюючись як хімічним, так і фізично. Номінальна товщина покриття 250 мкм, хімічний склад 87,74 % вуглецю та 12,26 % кисню [16]. Внаслідок особливостей процесу нанесення, полімерні ламіновані конструкції були обмежені неглибокими гофрами та тонкими заготовками з максимальним діаметром 3600 мм. Покриття труб з полімерним ламінатом дозволило використовувати їх у більш агресивних умовах навколишнього середовища та збільшити максимальну швидкість потоку через конструкцію до 4,5 м/с [17].

Полімерний ламінат не використовується в середовищах зі значними коливаннями температури протягом дуже коротких періодів часу; швидкий, екстремальний термічний цикл не є провідним середовищем для полімерної ламінованої сталі. Найстаріші полімерні ламіновані конструкції були встановлені у США, Вісконсіні в 1974 році. У Канаді встановлення почалося лише в 1970-х роках у Нью-Брансвіку та Онтаріо. Хоча полімерні ламіновані конструкції існували й раніше, Альберта була першою канадською провінцією, яка офіційно схвалила полімерні ламіновані покриття у 2002 році. У відповідь на це схвалення полімерні ламіновані покриття використовувалися в регіонах з високим вмістом луку та на швидкісних автомагістралях, де часто використовувалися протиожеледні солі. Онтаріо була другою провінцією, яка схвалила полімерні ламіновані покриття. У 2005 році полімерний ламінат використовувався на кількох проєктах автомагістралей, де переоблицьовували існуючі водопропускні труби.

Аналіз умов експлуатування призвів до розробки вказівок щодо розрахункового терміну служби, які окреслюють розрахунковий термін служби полімерних покриттів у різних умовах ґрунту та води.

Термопластична полімерна система складається ґрунтовки, збагаченої цинком, що містить щонайменше 60 % цинку, і верхнього покриття з кополімеру ЕАА, що містить мінімум 85 % ЕАА.

Сталеві пластини без покриття спочатку набувають шорсткості, очищаються за допомогою восьмиступеневої попередньої обробки, а потім наносять покриття. Замість ламінування сополімер розпилюється у вигляді порошку, який притягується до металевих пластин електростатичним струмом. Порошок затверджується в печі з контрольованою температурою перед проходженням через охолоджуючий тунель. Мінімальна товщина системи покриття становить 250 мкм. Однак типова товщина системи є набагато більшою із середнім показником 400 мкм.

Завдяки процесу нанесення порошкового розпилення та термічної активації система з полімерним покриттям доступна для всіх гофрованих сталевих листів, а також для спеціальних супутніх елементів, таких як сталь опори і опорні канали. Процес нанесення також дозволяє покрити краї пластини та отвори для болтів і захистити їх від розшарування країв у несприятливих умовах.

Першу встановлену конструкцію було зведено поблизу Кінгстона, Онтаріо, Канада у 2005 році. Конструкція була підземним переходом для Міністерства транспорту Онтаріо (МТО) і була покрита лише зовнішньою стороною (сторона ґрунту).

Плита з термопластичним полімерним покриттям набуває визнання в Канаді, поширена в Європі та США.

Сучасні термопластичні системи (рис. 3) дають можливість підвищити термін експлуатування до 75 — 100 років [7].

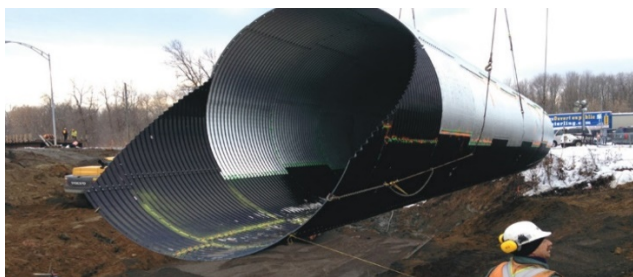


Рисунок3 – Застосування термопластичних пластин

*Джерело: на підставі [7]*

Під час піскоструминних випробувань полімерне покриття товщиною 12 мм дорівнювало асфальтобетонному покриттю товщиною 50 мм за стійкістю до стирання [9].

Дослідження в США показали, що труби з полімерним покриттям можуть використовуватися на об'єктах з високою швидкістю корозії та помірним потоком стирання [12]. Було зауважено, що зовнішня сторона труби має бути покрита полімером у регіонах з кислим ґрунтом, щоб запобігти корозії з боку ґрунту [18].

Для аналізу використано три полімерних покриття. Додатковий термін служби становить приблизно 7,9 і 30 років для покриттів на основі кам'яновугільної смоли (Nexon), полівінілхлориду (PBX) пластизолу (Beth-Cu-Loy) і плівки з етилену акрилової кислоти (DAF 625), відповідно [19]. Було зазначено, що стирання може зменшити термін служби, та проявляється протягом перших 2 років [19].

**Застосування епоксидних покриттів.** Оскільки дорожні водопропускні труби з епоксидним покриттям складаються лише зі сталевих труб, а не з оцинкованих сталевих труб, водопропускні труби з епоксидним покриттям не мають тривалого терміну служби [19]. В більшості випадків перші прояви корозії pojawiaються строком експлуатації 5 років [19]. Об'єкти в США, які перебувають під великим навантаженням, показали пошкодження покриття та виникнення корозії протягом перших 5 — 8 років експлуатації [19]. Однак в штаті Кентуккі (США) в місцях з високою кислотністю (рН від 3,5 до 5,5) вони експлуатувалося понад 13 років без слідів стирання чи корозії [12].

**Застосування покриттів на основі органічних в'язучих речовин.** Найпоширенішим захисним покриттям на основі органічних в'язучих речовин є гаряче нанесення бітумінозного матеріалу. Цей тип покриття часто покриває всю внутрішню та зовнішню частину водопропускної труби та забезпечує захист від корозії. Бітумне покриття також використовується для алюмінієвих труб, нержавіючої сталі та бетонних труб [12].

Вперше використані в 1925 році оцинковані сталеві труби з бітумним покриттям мають додатковий термін служби від 25 до 30 років порівняно з оцинкованою сталлю без покриття [19]. Звіт Флориди показує, що водопропускні труби з бітумним покриттям мають подовжений термін служби 28 років [12]. Перегляд існуючого дослідження в Нью-Йорку вказує на додаткові 25 років терміну служби. У звіті штату Мен прогнозований термін служби гофрованих металевих труб з бітумним покриттям збільшується на 40 років [12].

Бітумні покриття забезпечують більший захист від корозії з боку ґрунту, ніж від внутрішньої корозії труби [16, 17]. Довідник AISI щодо сталевих дренажних і дорожніх виробів передбачає (на основі досліджень у Каліфорнії), що можна додати додаткові 25 років служби, якщо домінуючим фактором є корозія з боку ґрунту. В США, штаті Арізона використовують бітумні покриття на металевих трубах, коли питомий опір ґрунту становить менше 2100 Ом·см. В США, штаті Оклахома використовують бітумні покриття на металевих водопропускних трубах, щоб забезпечити 50-річний термін служби [12].

Типова мінімальна товщина нанесення бітумного шару становить 1,3 мм (0,05 дюйма). Це нанесення забезпечує хороший захист від корозії з боку ґрунту, але дуже слабкий захист від стирання, і там, де швидкість потоку перевищує 2 м/с (6,5 футів/с).

Окрім обмеженої стійкості до стирання, більшість асфальтобетонних покриттів зазнають пошкоджень, коли водопропускна труба піддається впливу сонячного світла.

Ультрафіолетові промені та екстремальні температури часто призводять до розвитку тріщин, які оголюють голий метал і, зрештою, порушити зчеплення покриття.

Покриття на основі органічних в'язучих речовин можуть бути легкозаймистими. Там, де є високий ризик пожежі, слід розглянути бетонні торцеві стіни або інші ізоляційні матеріали. Особливу увагу слід приділяти під час транспортування та встановлення, щоб гарантувати, що покриття не пошкоджено та не відстане.

Типовий додатковий термін служби від використання покриття на основі органічних в'язучих речовин становить 10 років в середині труби[20] та до 30 років зовні труби.

В дослідженнях проведених в Нью-Йорк стверджується, що бітумні покриття значно збільшують термін служби оцинкованої сталі [12].

У своїх таблицях довговічності металевих труб Огайо DOT [21] передбачає 15-річний додатковий термін служби для бітумного покриття для водопропускних труб діаметром 54 дюйми і більше та 25 років для водопропускних труб діаметром 48 дюймів і менше.

Дослідження, проведене в Алабамі, прийшло до висновку, що оцинкована труба з бітумним покриттям має принаймні 25 років служби в корозійних середовищах. Згідно зі звітом у Флориді, бітумні покриття збільшують термін служби оцинкованої сталі ще на 10 років. Звіти показують, що для об'єктів Кентуккі з кислим ґрунтом рН 3,5 можна очікувати, що використання оцинкованої сталі з бітумним покриттям збільшить термін служби від 3 до 6 років. Водопропускні труби з оцинкованої сталі без покриття на цих дуже агресивних ділянках раніше мали термін служби один місяць. Дослідження, проведені в штаті Мен, показують, що труби з бітумним покриттям мають гарний термін служби в ґрунтах із резистивами понад 2400 Ом·см [12].

Дослідження в проведені в США в штатах Теннессі, Меріленді та Канзасі показали обмежене збільшення терміну служби. Основними причинами були відсутність адгезії та швидка корозія після впливу стирання на бітумне покриття. Канзас повністю припинив використання бітумних покриттів через відсутність адгезії до водопропускної труби. Вони стверджують, що руйнування покриття могло бути спричинене постійною зміною рівня вологості глинистого ґрунту всередині водопропускної труби [15].

Великим недоліком даного типу покриття є горючість під час можливого горіння трави, а також погіршення якості води, пов'язаної з впливом бітуму на навколишнє середовище, тому деякі регуляторні органи в різних країнах наклали обмеження на використання покриттів на основі органічних в'язучих речовин.

Краї бітумного покриття, які знаходяться вгорі всередині труби, є найменш стійкими до корозійно-абразивного впливу стоків. Слід звернути особливу увагу на захист цієї ділянки водопропускної труби [12]. Подальші проблеми можуть виникнути на кінцях водопропускної труби, де покриття може утворювати великі тріщини через сонячне світло та екстремальні температури [12].

Порівнюючи бітумні покриття з полімерними, полімерні покриття не забезпечували належної роботи, коли були присутні гострі камені та високі швидкості стоків [12].

**Покриття із застосуванням азбесту.** Дані покриття застосовуються в комбінації органічних в'язучих речовин та азбестових волокон. Просочені азбестом бітумне покриття, вперше використовувалося в 1936 році, були ефективними в середовищах з високою корозійно-абразивною дією. Азбестові волокна допомагають посилити адгезію бітумних покриттів, але самі по собі не будуть стійкими до стирання, однак швидкість стирання зменшилася через додаткову адгезію [12].

Дослідження, проведені в США, показали успішне застосування просочених азбестом бітумних покриттів у зменшенні ефекту стирання порівняно з простими металевими трубами з бітумним покриттям. Причиною є хороша адгезія бітумного покриття, просоченого азбестом [12]. У кислому, лужному або солонуватому водному середовищі металеві труби з бітумним покриттям, просочені азбестом, забезпечують більший термін служби, ніж металеві труби з ґрунтовим бітумним покриттям [9].

Оцинкована сталь, як правило, показала кращі характеристики, ніж звичайна асфальтобетонна оцинкована сталь. Найбільшим негативним показником даного покриття є розтріскування та стирання. Даний вид покриттів не застосовується внаслідок шкідливих властивостей азбесту для здоров'я людей.

В якості заміни бітумного покриття, просоченого азбестом, було запропоновано покриття з армованого волокна. Проведені лабораторні випробування бітумних покриттів із застосуванням арамідного волокна не показало належних результатів [19].

**Висновок.** Дорожні водопропускні труби експлуатуються в складних умовах, які спричиняють розвиток корозійного впливу на метал конструкції, а сам метал потребує належного захисту для забезпечення надійності та довговічності споруди в цілому. На даний час в Україні відсутні випробування альтернативних захисних покриттів цинкуванню, а покриття з алюмінованою сталлю взагалі не використовуються. Тому, є необхідність проведення експериментальних досліджень з розробкою рекомендацій, щодо застосування перспективних видів захисту дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій.

## Список літератури

1. Гаркуша М. В. Вплив корозії на технічний стан дорожніх водопропускних труб та сучасні методи їх ремонту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. I. С. 57 – 66. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.57-66](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.57-66)
2. West A., Williams K., Villeneuve D., Carroll P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada.
3. Corrugated Steel Pipe Institute (2011). Canadian Performance Guideline for Structural Plate Corrugated Steel Pipe and Deep Corrugated Structural Plate Structures. Technical Bulletin. Cambridge, Ontario.
4. Lax S., Peterson E.W. (2009). Characterization of chloride transport in the unsaturated zone near salted road. *Environ Geol*. Vol. 58, pp. 1041-1049.
5. Компанія Infrasteel. URL: <https://infrasteel.com/> (дата звернення: 04.10.2024).
6. БН В.2.3-218-198:2007 Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. [Чинний від 2007-02-01]. Київ, 2007. 51 с. (Інформація та документація).
7. Компанія Armtec. URL: <https://armtec.com/> (дата звернення: 04.10.2024).
8. Kunecki B., Janusz L., Korusiewicz L. (2017). The effect of corrosion and time on the behaviour of a steel culvert. [10.1201/9781315166605-98](https://doi.org/10.1201/9781315166605-98)
9. National Cooperative Highway Research Board (1978). Durability of Drainage Pipe, Transportation Research Board.
10. Tennessee Department of Transportation (1987). Roadway Design Guidelines.
11. Missouri Highway and Transportation Department (1990). Life Expectancy Determination of Zinc-Coated Corrugated Steel and Reinforced Concrete Pipe Used in Missouri.
12. Bradley R. Boyd J. L. Gattis II, William A. Myers, R. P. Selvam (1999). Guidelines for Selections of Pipe Culverts. TRC9601.
13. Peter J. B., James P. E. (1984). Metal-Loss Rates of the Coated Steel and Aluminum Culverts in New York Transportation Research Record, <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1984/1001/1001-009.pdf>
14. Hensley S., Perry P. (2006). Long-Term Durability Study: Long-Span Structures. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1736, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, pp. 62 – 70.
15. Hayes C. (1971). A study of the Durability of Corrugated Steel in Oklahoma, Oklahoma Department of Highways.

16. Warner Custom Coating Testing (2012). Comparative Test Results: Coatings Used in the Corrugated Steel Pipe Industry, Guelph, Ontario.
17. Corrugated Steel Pipe Institute (2012). Performance Guideline for Corrugated Steel Pipe Culverts (300mm to 3,600mm Diameter). Technical Bulletin. Cambridge, Ontario.
18. Koscenlny J. A. (1992). Polymer Coated and Paved Culverts in Southeastern Oklahoma, Oklahoma Department of Transportation.
19. Potter John C., et al. (1991). Durability of Special Coatings for Corrugated Steel Pipe, Report No. FHWA-FLP-91 -006, Federal Highway Administration.
20. Moore, I.D., F. Hu. (1996). Linear Viscoelastic Modelling of Profiled High Density Polyethylene Pipe. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23, 395-407.
21. Ohio Department of Transportation (2014). Location and Design Manual, Vol. 2: Drainage Design. Columbus

## References

1. Harkusha, M. V. (2023). Vplyv koroziyi na tekhnichnyy stan dorozhnikh vodopropusknykh trub ta suchasni metody yikh remontu. *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky. Kropyvnyts'kyi, TSNTU*. Issue. 8(39), Part. I. P. 57 – 66. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.57-66](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.57-66) [in Ukrainian].
2. West, A., Williams, K., Villeneuve, D., & Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada [in English].
3. Corrugated Steel Pipe Institute (2011). Canadian Performance Guideline for Structural Plate Corrugated Steel Pipe and Deep Corrugated Structural Plate Structures. Technical Bulletin. Cambridge, Ontario [in English].
4. Lax, S., & Peterson, E.W. (2009). Characterization of chloride transport in the unsaturated zone near salted road. *Environ Geol*. Vol. 58, pp. 1041-1049 [in English].
5. Kompaniya Infrasteel. Retrieved from <https://infrasteel.com/> [in English].
6. VBN V.2.3-218-198:2007 Proektuvannya ta budivnytstvo sporu iz metalevykh hofrovanykh konstruktсий na avtomobil'nykh dorohakh zahal'noho korystuvannya. [Chynnyy vid 2007-02-01]. Kyiv, 2007. 51 p. (Informatsiya ta dokumentatsiya) [in English].
7. Kompaniya Armtec. *armtec.com* . Retrieved from <https://armtec.com/> [in English].
8. Kunecki B., Janusz L., & Korusiewicz L. (2017). The effect of corrosion and time on the behaviour of a steel culvert. [10.1201/9781315166605-98](https://doi.org/10.1201/9781315166605-98) [in English].
9. National Cooperative Highway Research Board. (1978). Durability of Drainage Pipe, Transportation Research Board [in English].
10. Tennessee Department of Transportation. (1987). Roadway Design Guidelines [in English].
11. Missouri Highway and Transportation Department (1990). Life Expectancy Determination of Zinc-Coated Corrugated Steel and Reinforced Concrete Pipe Used in Missouri [in English].
12. Bradley, R., Boyd, J., Gattis L., William, II, Myers, A. & Selvam, R. P. (1999). Guidelines for Selections of Pipe Culverts. TRC9601 [in English].
13. Peter, J. B., & James, P. E. (1984). Metal-Loss Rates of thecoated Steet And Aluminum Culverts in New york Transportaion Research Record, Retrieved from <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1984/1001/1001-009.pdf> [in English].
14. Hensley, S., & Perry, P. (2006). Long-Term Durability Study: Long-Span Structures. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1736, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, pp. 62 – 70 [in English].
15. Hayes, C. (1971). A study of the Durability of Corrugated Steel in Oklahoma, Oklahoma Department of Highways [in English].
16. Warner Custom Coating Testing (2012). Comparative Test Results: Coatings Used in the Corrugated Steel Pipe Industry, Guelph, Ontario [in English].
17. Corrugated Steel Pipe Institute (2012). Performance Guideline for Corrugated Steel Pipe Culverts (300mm to 3,600mm Diameter). Technical Bulletin. Cambridge, Ontario [in English].
18. Koscenlny, J. A. (1992). Polymer Coated and Paved Culverts in Southeastern Oklahoma, Oklahoma Department of Transportation [in English].
19. Potter John C., et al. (1991). Durability of Special Coatings for Corrugated Steel Pipe, Report No. FHWA-FLP-91 -006, Federal Highway Administration [in English].
20. Moore, I.D., F. Hu. (1996). Linear Viscoelastic Modelling of Profiled High Density Polyethylene Pipe. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23. P. 395-407 [in English].
21. Ohio Department of Transportation (2014). Location and Design Manual, Volume 2: Drainage Design. Columbus [in English].

**Mykola Harkusha**, Assoc. Prof., PhD tech.sci.

*National Transport University, Kyiv, Ukraine*

### **Application of Waterproofing Coatings for Corrosion Protection of Road Culverts Made of Corrugated Metal Structures**

Road culverts made of corrugated metal structures were initially used as small pipes in both length and diameter. Today, road culverts made of corrugated metal structures are used with a span of 40 m and are a composite soil-steel system and are widely used in the field of transport construction. Road culverts made of corrugated metal structures are economical, aesthetically attractive, have the advantage of quick construction with minimal maintenance in the future, the estimated service life is usually from 50 to 100 years.

Constantly operating in wet conditions, road culverts made of corrugated metal structures are subject to corrosion and abrasion due to environmental influences. Corrosion occurs in several places, for example, on the surface in contact with the soil, on the inside of the pipe where flowing water is present, or on the surface exposed to air. This is due to aggressive substances in the air, water or soil backfill material, such as salts, metals or other aggressive chemicals. Corrosion is the main cause of the destruction of metal structures. The rate of degradation of materials depends on environmental conditions. The expected service time of road culverts is determined by the durability of the material and the durability of the structure. The durability of the material refers to the ability of the pipe to resist wear due to the natural processes of corrosion, abrasion and erosion. When designing road culverts made of corrugated metal structures, it is important to understand the environmental conditions throughout its service time in order to assess the suitability of the material. To ensure compliance with the design service time requirements, the steel structure is protected with an anti-corrosion coating.

The paper considers various protective coatings to increase the durability of road culverts from corrosion.

**waterproofing, durability, road culvert, protective coatings, corrosion**

*Одержано (Received) 23.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 26.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 621.867.84**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.101-110](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.101-110)

**В.В. Яцун**, проф., канд. техн. наук, **І.О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук,

**О.В. Горпинченко**, доц., канд. екон. наук

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

*e-mail: yatsun@i.ua*

## **Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу на розгінній ділянці пневмотранспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії**

Приведені основні результати досліджень з розробки та впровадження в виробництво новітніх технічних засобів та технологій у галузі геотехнологій, систем трубопровідного вібропневмотранспорту, герметичності порожнистих виробіток. Наукова новизна та практична значимість робіт полягає в можливості значно підвищити ефективність технологічних процесів за рахунок використання отриманих результатів. У статті досліджуються характеристики руху частинки кускового матеріалу на початковій ділянці транспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії (ВПМЦ).

**ділянка польоту частинок, рух поодинокі частинки, транспортний трубопровід**

© В.В. Яцун, І.О. Скриннік, О.В. Горпинченко, 2024

**Постановка проблеми.** Більше 60% виробленого простору очисних вибоїв вугільних та рудних шахт підлягають заповненню закладальним матеріалом з пустих порід як з метою підтримки покрівлі і зменшення просідання земної поверхні, так і з метою утилізації пустих порід. Для вирішення наведених проблем, доставки сипкого закладального матеріалу до очисних вибоїв в ІГТМ НАН України спільно з ЦНТУ розроблено принципово новий тип закладальної машини з примусовим розгоном матеріалу в зоні завантаження - вібраційно-пневмотранспортна машина циклічної дії (ВПМЦ), яка спроможна транспортувати закладальний матеріал на відстані до 2,5 км по трубопроводу з продуктивністю до 120 м<sup>3</sup>/год при габаритах машини 1,2 x 0,7 x 2,5 м. Удосконаленню конструкції машини присвячена дана робота [2, 13-15].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За останні п'ятдесят років наряду з розвитком традиційних видів транспорту в гірничій галузі широке застосування отримали системи пневматичного трубопровідного транспорту. Але використання цих видів транспорту, не дивлячись очевидність і загально прийнятних їх переваг, не відповідають можливим масштабам їх застосування. Це пов'язано з тим, що з однієї сторони залишається не вирішеним цілий ряд питань з вивчення механіки процесів, що відбуваються в транспортних трубопроводах, з другої сторони – надмірно обмежений обсяг і номенклатура промислового обладнання, що випускається в Україні. Це не дозволяє реалізувати на практиці передові ідеї з удосконалення існуючих і створенню нових конструкцій окремих елементів трубопровідних систем [1-4, 7, 10, 11].

Одним із основних питань удосконалення і розробки нових пневмотранспортних машин є дослідження руху сипучого кускового матеріалу в трубопровідній системі на різних ділянках і на основі цих досліджень створення нових або модернізація існуючих конструкцій [6, 8, 12].

Під час руху аеросуміші в трубопроводі витрачається робота на подолання опору руху повітря і матеріалу, який транспортується. Інтегральний (узагальнений) коефіцієнт опору аеросуміші в транспортному трубопроводі визначається як сукупність опору тертя повітряного середовища і твердих частинок об стінки трубопроводу, аеродинамічного опору повітряного середовища, тертя твердих частинок між собою. Під час розгляду цього складного механізму взаємодії використовують сукупність різних методів теоретичних і експериментальних досліджень. В результаті таких досліджень різними авторами [1, 6, 7] отримано залежності, що носять частковий емпіричний характер внаслідок складності взаємодії компонентів суміші в транспортному трубопроводі. У зв'язку з цим, поряд з вивченням механізму тертя опору, оцінюються також основні аеродинамічними параметрами потоку. На величину опору тертя мають вплив такі параметри аеросуміші як об'ємна концентрація, швидкість руху, діаметр трубопроводу і фізичні властивості сипкого кускового матеріалу, що транспортується.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи являється аналіз процесів, що протікають на розгінній ділянці пневмо-транспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії, управління рухом аеросуміші зміною параметрів повітряного потоку на матеріал, що переміщується і виявлення оптимальних технічних рішень стосовно умов транспортування сипких кускових матеріалів з різними фізико-механічними властивостями.

**Виклад основного матеріалу.** Однією з особливостей пневмотранспортування гірничої породи (закладального матеріалу) вібраційно-пневмотранспортною машиною циклічної дії є необхідність врахування кусковатості матеріалу (гранулометричного складу) (рис. 1). Кусковатість характеризується лінійними розмірами кусків насипного

вантажу, який вимірюється за трьома взаємно перпендикулярними напрямками, при цьому в одному з цих напрямків розмір куска повинен бути максимальним.

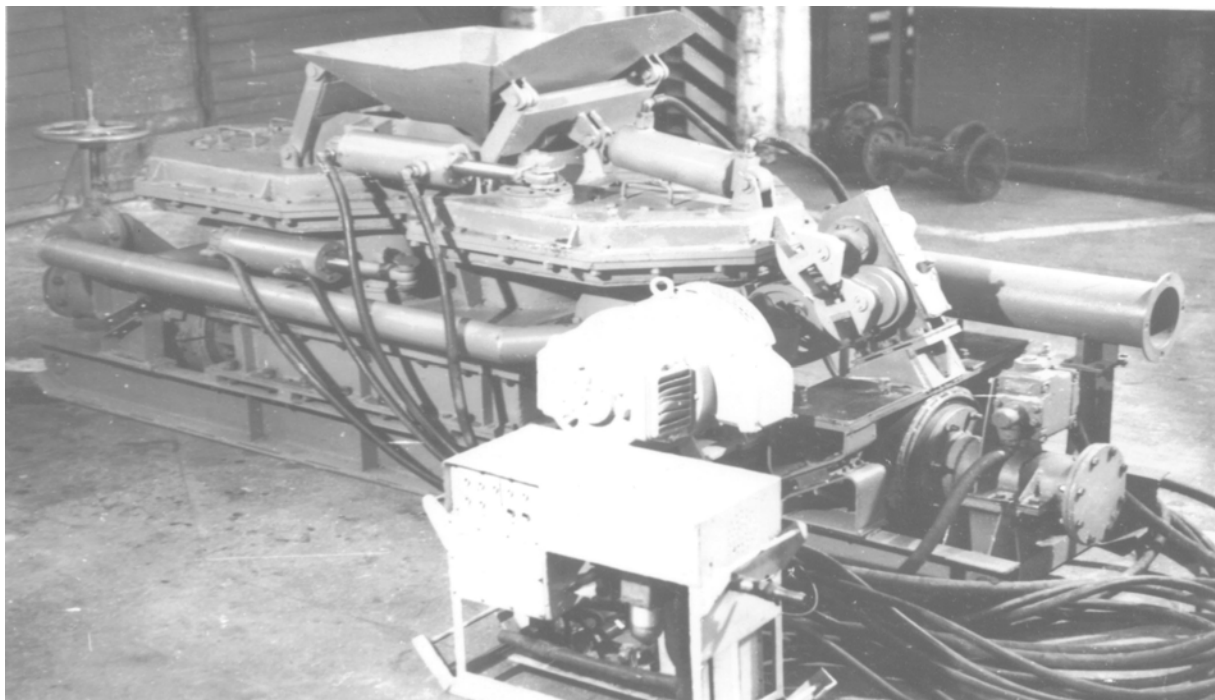


Рисунок 1 – Вібраційно-пневматична машина циклічної дії

*Джерело: розроблено авторами на підставі [12-15]*

Для кускових сипких матеріалів, що мають відносно велику вагу, найбільш можливі режими переміщення матеріалу у вигляді "відрив від поверхні - зважування в потоці повітря - падіння" і "перекочування або ковзання". Розглянемо режим "відрив від поверхні - зважування в потоці повітря - падіння" з повторенням цього процесу на кожному етапі.

Для визначення закону руху сипкого матеріалу, представленого поодинокими частинками, приймаються наступні допущення: висота траєкторії руху частинки на кожному етапі буде менше ніж на попередньому, при падінні частинки на нижню поверхню трубопроводу відбувається не цілком пружний удар, при  $y_{\max} < 0,1d$  приймаємо, що куски сипкого матеріалу рухаються без відриву від днища трубопроводу в режимі "перекочування або ковзання". Швидкість повітряного потоку стислого повітря в трубопроводі на даній ділянці постійна, поодинокі частинки діаметром  $d$  мають сферичну форму. Сукупність етапів з підскоком частинок називаємо далі ділянкою польоту частинок.

Розглянемо рух поодинокі частинки масою  $m$ , діаметром  $d$  у потоці стислого повітря густиною  $\rho_1$  (рис. 2).

Частинка влітає і падає в трубопровід по низхідній траєкторії із завантажувально-розгінної ділянки до зустрічі з нижньою поверхнею трубопроводу. Потім відбувається зіткнення частинки зі стінкою трубопроводу так, що частинка, одержавши імпульс від не цілком пружного удару у вертикальному напрямі, продовжує політ до зустрічі з нижньою поверхнею трубопроводу.

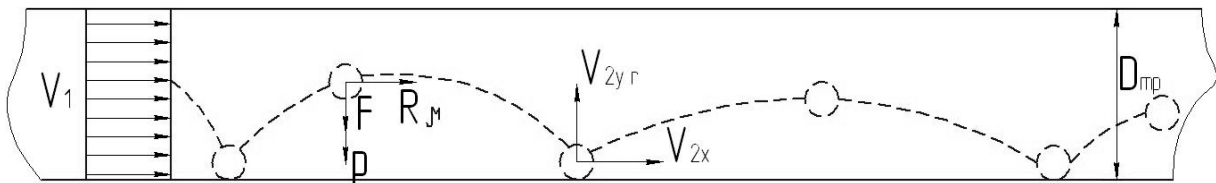


Рисунок 2 – Розрахункова схема руху кускового сипкого матеріалу у транспортному трубопроводі на ділянці польоту частинки

Джерело: розроблено авторами

На частинку діють в горизонтальному напрямі струмін стислого повітря з силою [1]:

$$F_{\mu} = \frac{c_{\mu} \rho_1 (v_{1x} - \dot{x})^2 S_M}{2},$$

де  $c_{\mu}$  – коефіцієнт динамічного опору;

$S_M = \frac{\pi d^2}{4}$  – площа поперечного перетину частинки;

$\dot{x}$  – миттєва швидкість частинки по осі X;

$v_{1x}$  – швидкість повітря.

Уздовж вертикальної осі на частинку діє сила тяжіння і опору повітря. У зв'язку з тим, що по осі ОУ відносна швидкість частинки повітря малі, сила опору повітря визначається за законом Стоксу

$$R = 3\pi\mu_1 d\dot{y},$$

де  $\mu_1$  - динамічний коефіцієнт в'язкості повітря.

Диференціальні рівняння, що описують рух поодинокі частинки на даній ділянці транспортного трубопроводу, записуються у вигляді [2]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \frac{c_{\mu} \rho_1 (v_{1x} - \dot{x})^2 S_M}{2}; \\ m\ddot{y} = mg + 3\pi\mu_1 d\dot{y}. \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) складається з двох незалежних диференціальних рівнянь, тому рішення їх виконується по черзі. Для цього вводяться позначення:

$$\dot{x} = z, \quad N = \frac{c_{\mu} \rho_1 S_M}{2m}.$$

Тоді перше рівняння системи (1) прийме вигляд:

$$\frac{dz}{dt} = N(v_{1x} - z)^2$$

або

$$\frac{dz}{(v_{1x} - z)^2} = N dt. \quad (2)$$

Інтегруючи (2) отримують:

$$z = v_1 - \frac{1}{Nt + c_1}. \quad (3)$$

Постійна інтеграції  $c_1$  визначається з початкових умов:

$$t = 0, \dot{x} = v_{2x,0},$$

де  $v_{2x,0}$  - горизонтальна складова початкової швидкості руху частинки на даній ділянці, яка дорівнює горизонтальній складовій кінцевої швидкості руху на завантажувально-розгінній ділянці транспортного трубопроводу [3].

$$c_1 = \frac{dz}{v_1 - v_{2x,0}}.$$

Підставляючи  $c_1$ , отримують вираз горизонтальної складової швидкості руху поодинокі частинки:

$$v_{2x} = v_1 - \frac{1}{Nt + \frac{1}{v_1 - v_{2x,0}}}.$$

Інтегруючи вираз (3), отримують:

$$x = v_1 t - \frac{1}{N} \ln(Nt + c_1) + c_2. \quad (4)$$

Враховуючи початкові умови:

$$t = 0, x = 0,$$

визначають  $c_2$ :

$$c_2 = \frac{1}{N} \ln c_1 - \frac{1}{N} \ln \frac{1}{v_1 - v_{2x,0}}.$$

Підставивши  $c_2$  у вираз (4) і провівши деякі перетворення, отримують вираз горизонтальної проекції шляху частинки, на даній ділянці:

$$x = v_1 t - \frac{1}{N} \ln \left[ Nt - (v_1 - v_{2x,0}) + 1 \right]. \quad (5)$$

Застосувавши позначення:

$$3\pi\mu_1 d = \alpha, \quad \frac{\alpha}{m} = k$$

друге рівняння системи (1) можна записати у вигляді:

$$\ddot{y} = g + k\dot{y}. \quad (6)$$

Увівши змінну

$$l = g + k\dot{y}$$

з урахуванням якої, рівняння (6) прийме вигляд:

$$\frac{dl}{l} = kdt.$$

Інтегруючи це рівняння, отримують:

$$\ln(g + kv_{2y}) = kt + c_1, \quad (7)$$

де  $v_{2y} = \dot{y}$ .

На підставі фізичних представлень даного процесу приймаються нульові початкові умови:

$$t = 0, \quad v_{2y,0} = -v_{2y}\eta, \quad (8)$$

де  $v_{2y}$  - вертикальна складова кінцевої скінченної швидкості руху частинки на завантажувально-розгінній ділянці [3];

$\eta$  – коефіцієнт відновлення при ударі частинки об поверхню робочого органу [4].

З початкових умов (8) можна визначити:

$$c_1 = \ln[(g - kv_{2y,0}\eta)]. \quad (9)$$

Підставляючи в (7) значення  $c_1$  і, потенціюючи його, після перетворень отримують вираз вертикальної складової швидкості руху поодинокі частки на етапі від нижньої поверхні трубопроводу до верхньої точки траєкторії польоту частинки ( $y_{\max}$ ):

$$v_{2y}^I = \dot{y}_I = \frac{1}{k} [e^{kt}(g - kv_{2y,0}\eta) - g]. \quad (10)$$

Час руху частинки від нижньої поверхні трубопроводу до верхньої точки траєкторії польоту визначається з рівняння (7) з урахуванням (9):

$$t_I = \frac{1}{k} \ln \frac{g}{g - kv_{2y,0}\eta}. \quad (11)$$

Інтегруючи рівняння (10) отримують закон руху частинки у вертикальному напрямі:

$$y_I = \frac{e^{kt}}{k^2} (g - kv_{2y,0}\eta) - \frac{gt}{k} + c_2.$$

Враховуючи початкові умови:

$$t = 0, \quad y = 0$$

визначається  $c_2$ :

$$c_2 = \frac{g - kv_{2y,0}\eta}{k^2}.$$

Для вирішення відносно  $t$  трансцендентного рівняння використовується розкладання  $e^{kt}$  у вигляді ряду:

$$e^{kt} = 1 + kt + \frac{(kt)^2}{2!} + \frac{(kt)^3}{3!} + \dots$$

для малих значень  $k$  приймається:

$$e^{kt} = 1 + kt + \frac{(kt)^2}{2!}. \quad (12)$$

Підставляючи вираз (12) в рівняння для  $y_I$  і враховуючи значення  $c_2$ , отримують:

$$y_I = \frac{gt_I^2}{2} - v_{2y,0}\eta\left(\frac{kt_I^2}{2} - t_I\right). \quad (13)$$

Рух поодинокі частинки від  $y_{\max}$  до нижньої поверхні трубопроводу, аналогічний руху її на завантажувально-розгінній ділянці, де вертикальна складова швидкості частинки визначається згідно виразу [3]:

$$v_{2y}^{II} = \frac{g}{k}(1 - e^{kt}).$$

Час польоту частинки від  $y_{\max}$  до нижньої поверхні трубопроводу визначається аналогічно завантажувально-розгінній ділянці [3]:

$$t = \sqrt{\frac{2y_{\max}}{g}}. \quad (14)$$

Повний час руху частинки визначається за допомогою виразів (11) і (14):

$$t = t_I + t_{II} = \frac{1}{k} \ln \frac{g}{g - kv_{2y,0}\eta} + \sqrt{\frac{2y_{\max}}{g}}. \quad (15)$$

Величина горизонтальної проекції шляху частинки до падіння її на нижню поверхню трубопроводу встановлюється шляхом підстановки знайденого значення  $t$  в рівняння (5).

Числові розрахунки на основі формул (4), (5), (10), (13) і (15), для ділянки польоту частинок виконувалися з застосуванням прикладних програм при наступних значеннях робочих параметрів:

$v_1 = 50$  м/с;  $m = 0,00103$  кг;  $c_m = 0,1$ ;  $P_0 = 0,6$  І06 Па;  $\rho_2 = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2 = 7,2$  кг/м<sup>3</sup>;

$v_{2x,0} = 22$  м/с;  $v_{2y,0} = 1,5$  м/с;  $\mu = 0,000018 \frac{H \cdot c}{m^2}$ ;  $d = 0,01$  м;  $\eta = 0,2 - 0,5$ .

На рисунку 3 і рисунку 4 представлені залежності горизонтальної протяжності ділянки стрибкоподібного руху кускового матеріалу і висоти польоту частинки на першому етапі ділянки польоту від коефіцієнта відновлення при ударі.

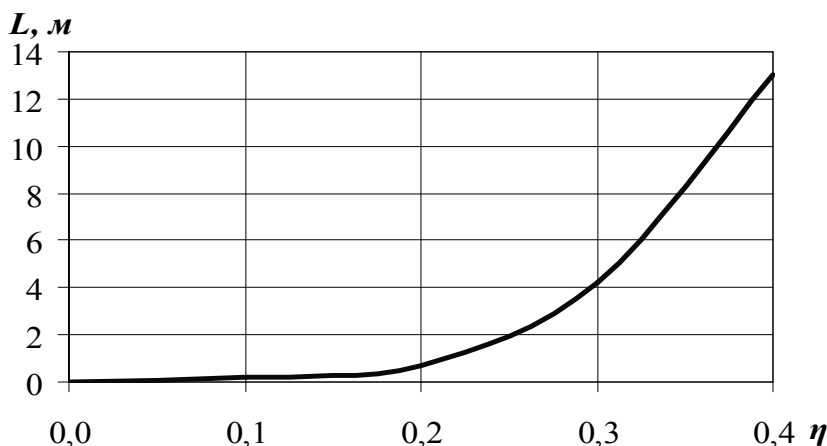


Рисунок 3 – Залежність горизонтальної довжини ділянки стрибкоподібного руху кускового сипкого матеріалу від коефіцієнта відновлення при ударі

Джерело: розроблено авторами

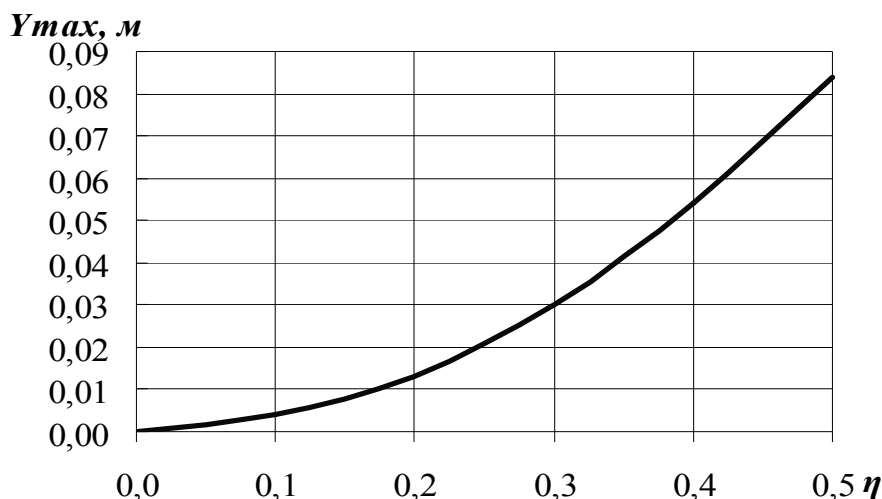


Рисунок 4 – Залежність висоти польоту частинки сипкого матеріалу на першій ділянці від коефіцієнта відновлення при ударі

Джерело: розроблено авторами

На рис. 5 показана траєкторія руху поодинокі частинки в транспортному трубопроводі при  $\eta = 0,4$ . Вищенаведені графічні залежності дозволяють оцінити характер руху кускового матеріалу залежно від варійованих параметрів.

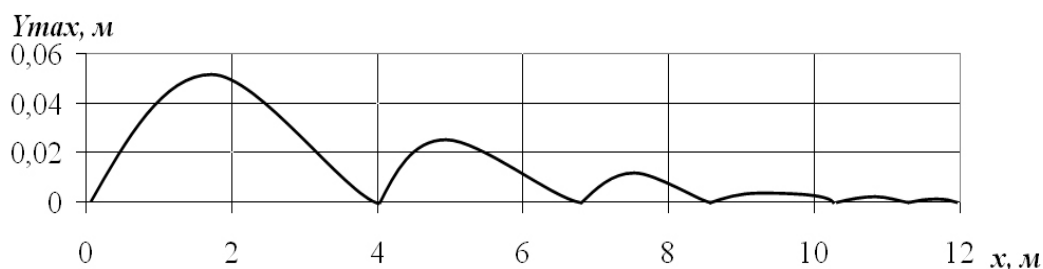


Рисунок 5 - Траєкторія руху поодинокі частинки матеріалу в транспортному трубопроводі при  $\eta = 0,4$

Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** Отже, сукупність приведених вище залежностей дозволяє встановити траєкторію і час руху куску сипкого матеріалу в режимі "відрив від поверхні - зважування в потоці повітря - падіння". Одержані дані свідчать про те, що в робочому діапазоні параметрів протяжність ділянки польоту частинки залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу, а зокрема від коефіцієнта відновлення при ударі частинки об поверхню трубопроводу, змінюється від 0,5 м до 12 м.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі передбачають створення нової машини задля зменшення енерговитрат на транспортування закладального матеріалу.

## Список літератури

1. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Investigation and Design Considerations for Vibrating Pneumatic Units in the Bulk Material Transport Systems / Bulk materials: keeping, loading and unloading operation and transportation. Pap. 3 rd Int. Conf. Newcastle, Australia, 27 - 29 june 2000.

2. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Vibratory pneumatic machines for transportation of bulk materials / Pap. 4 th Int. Conf. of Pneumatic Conveying. Budapest, Hungaru, 2002.
3. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Periodical regimes of solid particles motion in the gas flow horizontal channal / Pap. The 18 Int. Congr. Theor. and Appl. Mech. (UTAM). Haifa, Israel, 2001.
4. Волошин О.І., Булат А.Ф., Пономаренко С.М., Кордюк О.Л. Механіка двофазних потоків. Том 2. Вібраційний вплив при пневмо-транспортуванні сипких матеріалів. К.: Наукова думка, 2019. 148 с..
5. Волошин О.І., Пономаренко С.М. Механіка двофазних потоків у пневмо-транспортних системах ежекторного типу. К.: Наукова думка, 2020. 168 с. [in Ukrainian].
6. Ponomarenko S. Efficiency and reliability of the ejector-type pneumatic transport facilities application in mining industry. International independent scientific journal № 24. Kraków, Rzeczpospolita Polska. 2021. P. 40-45.
7. Пономарьов Б. В. Розвиток теорії вібропневмо-транспортування закладальних матеріалів: дис. д-ра техн. наук: 05.15.11 / НАН України; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова. Д., 2006.
8. Гушин В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів / В.М. Гушин // Машинознавство, 2000, №2 (23). С. 39-43.
9. Bredenbruch E. Entstehung und Verhütung von Gruben branden // Glückauf. 2004.Н. 15/16.Р. 393-404.
10. Tsuji Y., Morikawa Y., Tanaka L. Numerical simulation of gas-solid twophase flow in a two-dimensional horizontal channel // Int. J. Multiphase Flow. 2017. 13, № 5. P. 671-684.
11. Li K., Kuang S. B., Pan R. H. (2014). Numerical study of horizontal pneumatic conveying:effectof materia lprop-erties, PowderTechnology, vol. 251. P. 15–24. doi: 10.1016 / j. powtec. 2013.10.013
12. Волошин О.І., Яцун В.В. Деякі питання створення закладальних вібраційно-пневматичних машин циклічної дії. *Збірник наукових праць НГА, вип. 2 (34). Сучасні шляхи розвитку гірничого обладнання*. Дніпропетровськ: НГА, 2007. С. 67-73.
13. А. с. 1444541 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Вібраційно – пневматична камерна закладальна машина / В.Н. Потураєв, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 4248362 заяв. 02.04.87 : опуб. 15.12.87, Бюл. 46.
14. А. с. 1530799 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Вібраційно – пневматична камерна закладальна машина / В.Н. Потураєв, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 4374984 заяв. 08.02.88 : опуб. 23.12.89, Бюл. 47.
15. А. с. 1532720 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Вібраційно – пневматична камерна закладальна машина

## References

1. Poturayev V.N., Voloshin A.I., & Ponomaryov B.V. (2000). Investigation and Design Considerations for Vibrating Pneumatic Units in the Bulk Material Transport Systems / Bulk materials: keeping, loading and unloading operation and transportation. Pap. 3 rd Int. Conf. Newcastle, Australia, 27 - 29 june [in Australia].
2. Poturayev V.N., Voloshin A.I., & Ponomaryov B.V. Vibratory pneumatic machines for transportation of bulk materials / Pap. 4 th Int. Conf. of Pneumatic Conveying. Budapest, Hungaru, 2002. [in Hungaru].
3. Poturayev V.N., Voloshin A.I., & Ponomaryov B.V.( 2002). Periodical regimes of solid particles motion in the gas flow horizontal channal / Pap. The 18 Int. Congr. Theor. and Appl. Mech. (UTAM). Haifa, Israel. [in Israel].
4. Voloshyn O.I., Bulat A.F., Ponomarenko S.M., & Kordyuk O.L. (2019). Mechanics of two-phase flows. Volume 2. Vibration effect during pneumatic transportation of loose materials. K.: Naukova dumka, 148 p. [in Ukrainian].
5. Voloshyn O.I., & Ponomarenko S.M. (2020). Mechanics of two-phase flows in pneumatic transport systems of the ejector type. K.: Naukova dumka,. 168 p. [in Ukrainian].
6. Ponomarenko S. (2021). Efficiency and of reliability the ejector-type pneumatic transport facilities application in mining industry. International independent scientific journal № 24. Kraków, Rzeczpospolita Polska. P. 40-45. [in Polska].
7. Ponomaryov B. V. (2006). Development of the theory of vibro-pneumatic transportation of laying materials: thesis... Dr. Tech. Sciences: 05.15.11 / NAS of Ukraine; Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakova. D. [in Ukrainian].
8. Gushchin V.M. (2000) A new concept and its implementation in the development of highly efficient means of pneumatic transportation of bulk materials / V.M. Gushchin // Mechanical Science, No. 2 (23). P. 39-43. [in Ukrainian].
9. Bredenbruch E. Entstehung und Verhütung von Gruben branden // Glückauf.-2004.-Н. 15/16.-S.393-404.
10. Tsuji Y., Morikawa Y., & Tanaka L. (2017). Numerical simulation of gas-solid twophase flow in a two-dimensional horizontal channel // Int. J. Multiphase Flow. 13, № 5. P. 671-684. [in Japan].

11. Li K., Kuang S. B., & Pan R. H. (2014). Numerical study of horizontal pneumatic conveying: effect of material properties, Powder Technology, vol. 251. P. 15–24. doi: 10.1016/j.powtec.2013.10.013 [in English].
12. Voloshyn O.I., & Yatsun V.V. (2007). Some issues of creation of laying vibration-pneumatic machines of cyclic action. Collection of scientific papers of the National Academy of Sciences, issue 2 (34). Modern ways of development of mining equipment. Dnipropetrovsk: NGA. P. 67–73. [[in Ukrainian].
13. A. with. 1444541 USSR, MKY E 21 F 15/10. Vibration-pneumatic chamber laying machine / V.N. Poturaev, A.I. Voloshyn, V.V. Yatsun. Application No. 4248362. 02.04.87 : publ. 15.12.87, Bull. 46.
14. A. with. 1530799 USSR, MKY E 21 F 15/10. Vibration-pneumatic chamber laying machine / V.N. Poturaev, A.I. Voloshyn, V.V. Yatsun. Application No. 4374984. 08.02.88: publ. 23.12.89, Bull. 47.
15. A. with. 1532720 USSR, MKY E 21 F 15/10. Vibration-pneumatic chamber laying machine / V.N. Poturaev, A.I. Voloshyn, V.V. Yatsun. No. 4394936: application. 21.03.88: publ. 30.12.89, Bull. 48.

**Volodymyr Yatsun**, Prof., PhD tech. sci., **Ivan Skrynnik**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olha Horpynchenko**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Study of the Mechanics of the Movement of Loose Lumpy Material in the Acceleration Section of the Pneumo-transport Pipeline of the Vibration-pneumotransport Machine of Cyclic action**

The purpose of this work is to analyze the processes taking place in the acceleration section of the pneumo-transport pipeline of the vibration-pneumatic machine of cyclic action, control the movement of the aeromixture by changing the parameters of the air flow on the moving material, and identify the optimal technical solutions regarding the conditions of transportation of loose lumpy materials with different physical mechanical properties.

The brought results over of researches of influence of size of parts of mountain breed that is transported, on the parameters of pneumatic portage. The got dependences are for determination of speed of pneumatic portage and charges of the compressed air from the size of parts of material that is transported, taking into account the parameters of the pneumatic portage system.

The combination of the above dependencies allows you to establish the trajectory and time of movement of a piece of loose material in the "detachment from the surface - weighing in the air flow - fall" mode. The obtained data indicate that in the working range of parameters, the length of the particle flight section, depending on the physical and mechanical properties of the material, and in particular on the recovery coefficient when the particle hits the pipeline surface, varies from 0.5 m to 12 m.

The research data will allow to improve the structural scheme of the vibration-pneumatic machine of cyclic action in order to improve technical and economic indicators and work efficiency.

**particle flight section, movement of a single particle, transport pipeline**

*Одержано (Received) 19.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 03.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.869

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.111-119](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.111-119)**О.В. Щербак**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Сумінов**, асист.*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м Харків, Україна**e-mail: andrey.suminov@gmail.com***С.Л. Хачатурян**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: serg5407@gmail.com*

## Дослідження навантажень несучої системи навантажувача в залежності від параметрів шарнірного з'єднання напіврам

Стаття є першою частиною циклу досліджень шарнірного з'єднання фронтального навантажувача вантажопідйомністю 3т. Для порівняння обрано концепцію побудови рами західних виробників з приблизно однаковою вантажопідйомністю, створено 3D модель нової рами у чотирьох варіантах з різною величиною з'єднувального шарніру. Розглядається положення, коли навантажувач під час набору матеріалу в ківш зустрічає непереборну перешкоду. Аналізувались навантаження на верхньому та нижньому з'єднанні напіврам та навантаження усєї рами в цілому. Розрахунки проводились в динаміці з використанням програмного комплексу для інженерного аналізу та чисельного моделювання Ansys з використанням модуля розрахунку руху. Комп'ютерне моделювання дозволяє за короткий час змодельовати різні сценарії поведінки несучої системи навантажувача в процесі роботи. Таким чином отримані результати, за якими можна виявити недоліки конструкції та внести зміни на етапі проєктування, а також зекономити матеріали, час та кошти на виготовлення дослідних зразків нового обладнання та проведення натурних випробувань. За результатами можна визначити слабкі місця конструкції та внести зміни на стадії проєктування.

**навантаження, CAD, CAE, Solidworks, Ansys, несуча система, динаміка, шарнірна рама, міцність**

**Постановка проблеми.** Несуча система (рама) фронтального навантажувача є основним елементом машини. При руйнуванні рами вся машина виходить з ладу, незважаючи на працездатність інших вузлів та агрегатів (рис. 1), тому для тривалої та безперервної роботи навантажувача рама повинна відповідати жорстким вимогам до міцності та надійності. Найвідповідальнішим елементом у рамі фронтального навантажувача є шарнірне з'єднання передньої та задньої напіврами.



Рисунок 1 – Ремонт шарнірного з'єднання фронтального навантажувача

Джерело: <https://www.youtube.com/watch?v=sVNd5uvLECM>

© О.В. Щербак, А.В. Сумінов, С.Л. Хачатурян, 2024

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз навантаженості несучої системи навантажувача було розглянуто в статтях [1-2], але в них не враховувались параметри рами, аналіз був проведений у статиці. У роботі [3] до статичного розрахунку додано ще розрахунок на втомну довговічність конструкції, за результатами якого було отримано слабкі місця існуючої конструкції несучої системи, а в роботі [4] розрахунки проводились вже у динаміці з дослідженням руху навантажувача під час проїзду по нерівній поверхні з піднятим наповненим ковшем. У статтях [5-15] розглянуті загальні принципи розрахунків несучих систем різних машин.

**Постановка завдання.** Конструкція шарнірного з'єднання напіврам має принципово однакову схему. Два, в рідких випадках три, вуха однієї напіврамы та місця з отворами на іншій напіврамі, котрі з'єднуються фіксуючими пальцями. Зазвичай переважна більшість конструкцій таких рам виготовлені методом зварювання елементів з листового металу (рис.2), також зустрічаються конструкції з'єднувального шарніру виготовленні методом лиття (рис. 3), але такі конструкції є менш надійними, ніж конструкції з листового металу з причини виникнення у литві пор і раковин.



Рисунок 1 – Конструкція рами з листового металу навантажувача Caterpillar

*Джерело: буклет фронтальних навантажувачів Caterpillar*

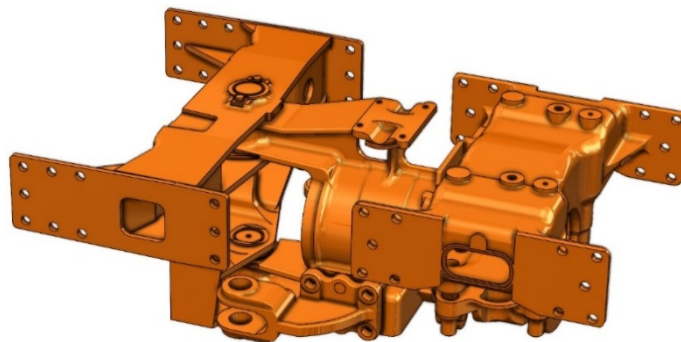


Рисунок 3 – Конструкція з'єднувального шарніру фронтального навантажувача Т-156Б виготовлена методом лиття

*Джерело: розроблено авторами*

Основною відмінністю таких конструкцій є відстань між верхнім і нижнім з'єднаннями (рис. 4). У таблиці 1 зібрано параметри навантажувачів закордонного виробництва та навантажувач вітчизняного виробництва Харківського тракторного заводу Т-156Б, усі дані взяті з брошур.

Якщо для навантажувача Т-156Б було обрано шарнірне з'єднання з відстанню 278 мм між шарнірами, тому що вся рама взята з сільськогосподарського трактора ХТЗ-150К та мінімально модернізована під навантажувальне обладнання, то для інших прийнятих до аналізу моделей навантажувачів не зрозуміло, за яким принципом обирався даний параметр і як він впливає на навантаженість рами.

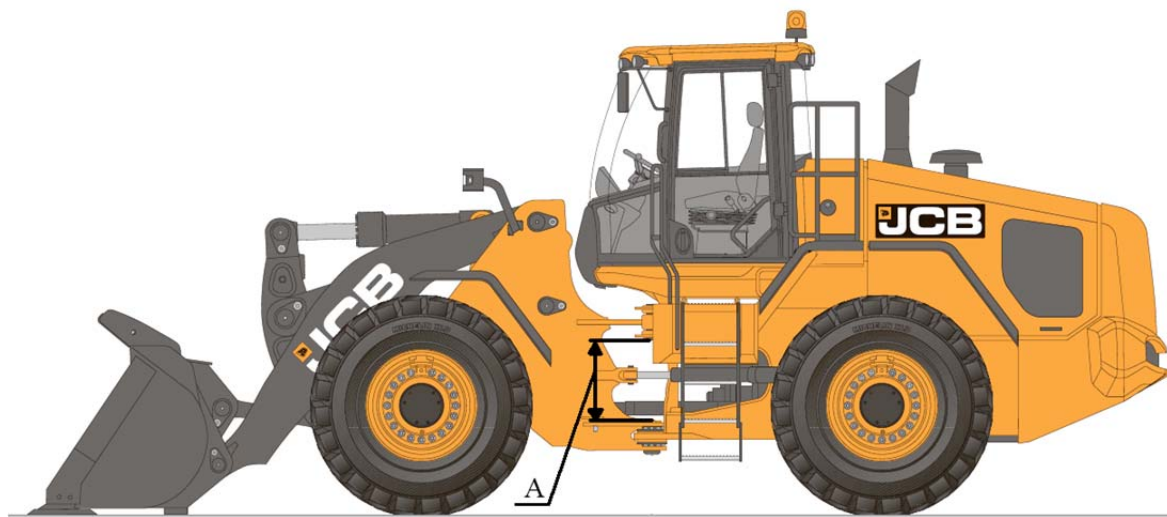


Рисунок 4 – Відстань між верхнім і нижнім шарніром з'єднання

Джерело: буклет фронтальних навантажувачів JCB

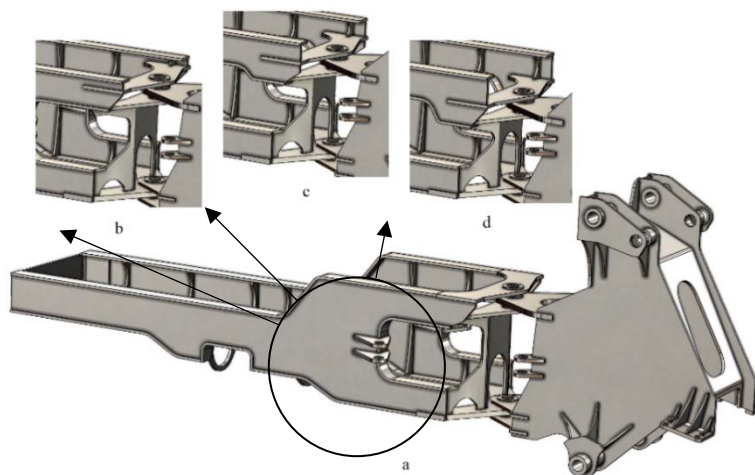
Таблиця 1 – Параметр А несучої системи фронтальних навантажувачів

| Модель навантажувача | Об'єм ковша, м <sup>3</sup> | Параметр А, мм |
|----------------------|-----------------------------|----------------|
| JSB 426ZX            | 2,1                         | 580            |
| VOLVO L60F           | 1,7                         | 555            |
| Caterpillar 924K     | 1,7                         | 420            |
| XT3 T-156Б           | 1,5                         | 278            |

Джерело: розроблено авторами

**Виклад основного матеріалу.** Питання навантаженості конструкцій рами з різним параметром А можливо вирішити за допомогою комп'ютерного моделювання, виконавши аналіз динаміки руху. Метою аналізу є виявлення впливу різних конфігурацій несучої системи на її навантаженість, та яка з конфігурацій є оптимальною з точки зору надійності. Для цього за допомогою програми тривимірного моделювання Solidworks версії 2022 було створено раму у чотирьох варіаціях з різним параметром А: 555мм, 500мм, 450мм, 400мм (рис. 5) та встановлено на шасі навантажувача Т-156Б. Розрахунки проводились за допомогою програмного пакету Ansys версії 2024R2. Постановка задачі була виконана в розрахунковому модулі «Motion». Була розглянута модель виконання робочого процесу навантажувачем, при якому машина під час набирання матеріалу в ківш стикається з непереборною перешкодою.

Після побудови 3D моделей, кожен зразок імпортується у середовище Ansys в окремий модуль Motion у розділі Geometry. Також у розділі Engineering Data додається матеріал, з якого виготовлена 3D модель. На наступному кроці у розділі Mesh будувалась сітка 3D моделі (рис. 6).



a – 555 мм; b – 500 мм; c – 450 мм; d – 400 мм.

Рисунок 5 – Дослідні зразки рами з різним параметром А

Джерело: розроблено авторами

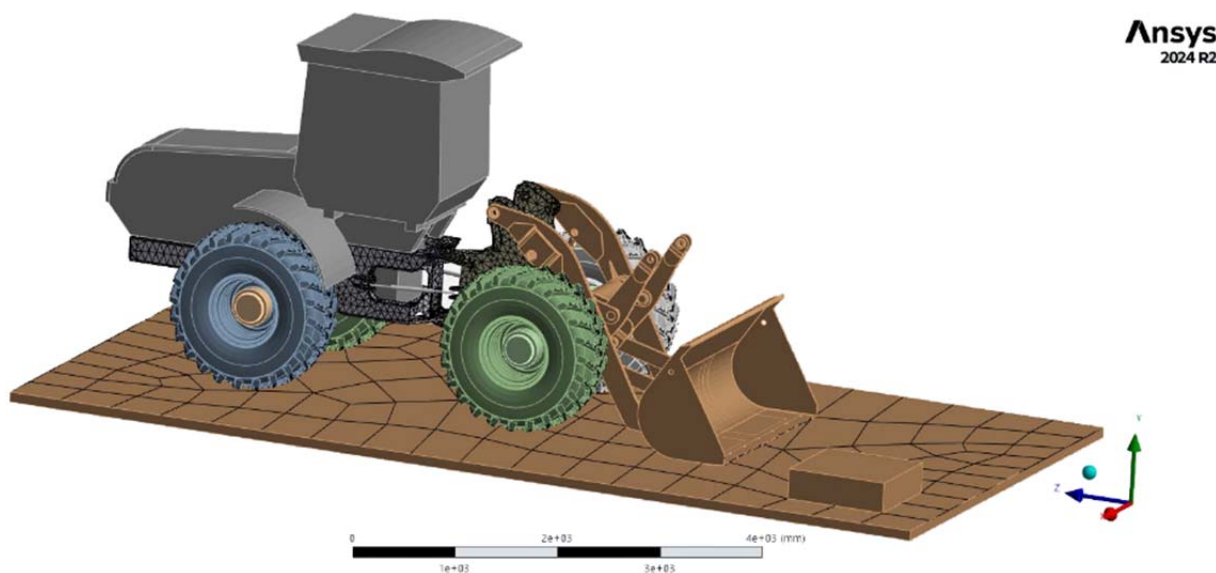


Рисунок 6 – Побудована сітка на моделі та поверхнях, які взаємодіють між собою

Джерело: розроблено авторами

На етапі визначення умов розрахунку у розділі Setup (рис 7) визначаються всі поверхні, що контактують між собою та тип їхнього контакту. Це може бути контакт bonded, no separation, frictional та frictionless. Такі типи контактів відображаються в теці contacts. Також задаються шарніри рухомих та нерухомих елементів моделі з зазначенням типу шарніра. Для коліс задається тип шарніру revolute та planar, для з'єднань напіврам задається шарнір cylindrical. Для усіх інших елементів моделі для встановлення їх реальної маси задається тип шарніру fixed. Наступним кроком додається сила гравітації та властивості для контактуючих об'єктів, такі як коефіцієнт тертя.

У розділі Solution задається час, впродовж якого буде розраховуватись рух моделі та кількість кроків розрахунку. Далі розрахунок запускається на виконання.

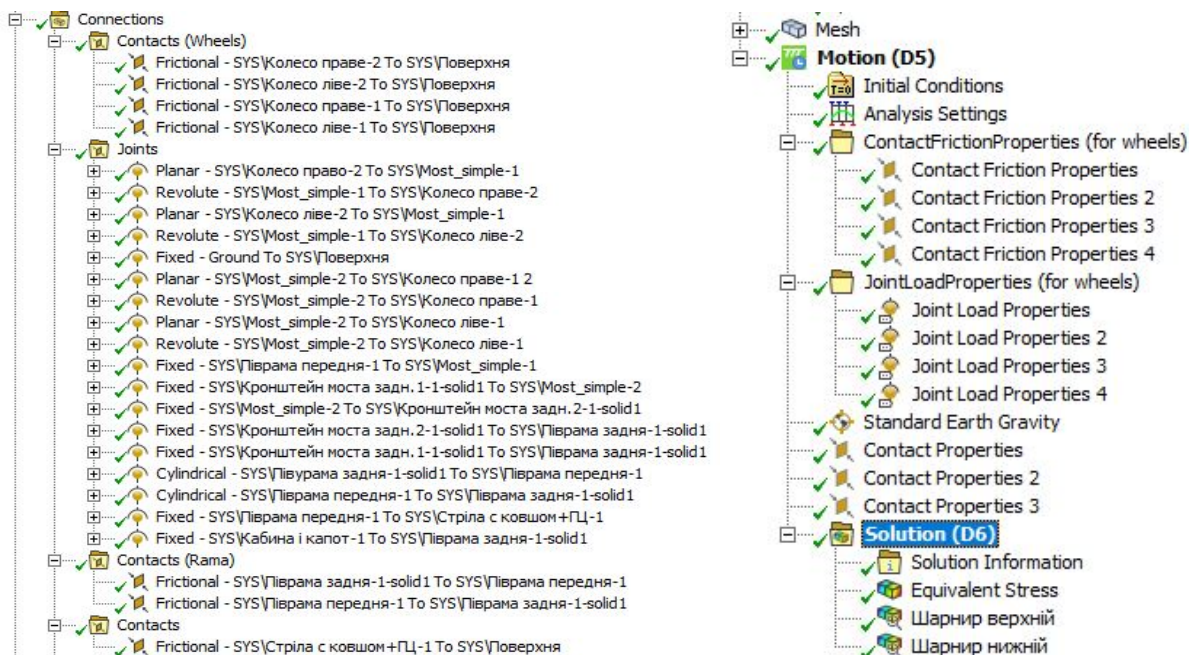


Рисунок 7 – Вікно налаштувань умов розрахунку

Джерело: розроблено авторами

Після проведених програмою розрахунків отримаємо значення напружень і зусиль, які діють на верхнє та нижнє шарнірне з'єднання, у вигляді кольорового градієнту від синього до червоного кольору. Синім кольором показані найменш навантажені частини, а чим більше колір наближається до червоного, то тим більше навантаження на відповідній ділянці моделі (рис. 8). Також зазначені навантаження формуються у вигляді графіку (рис. 9).

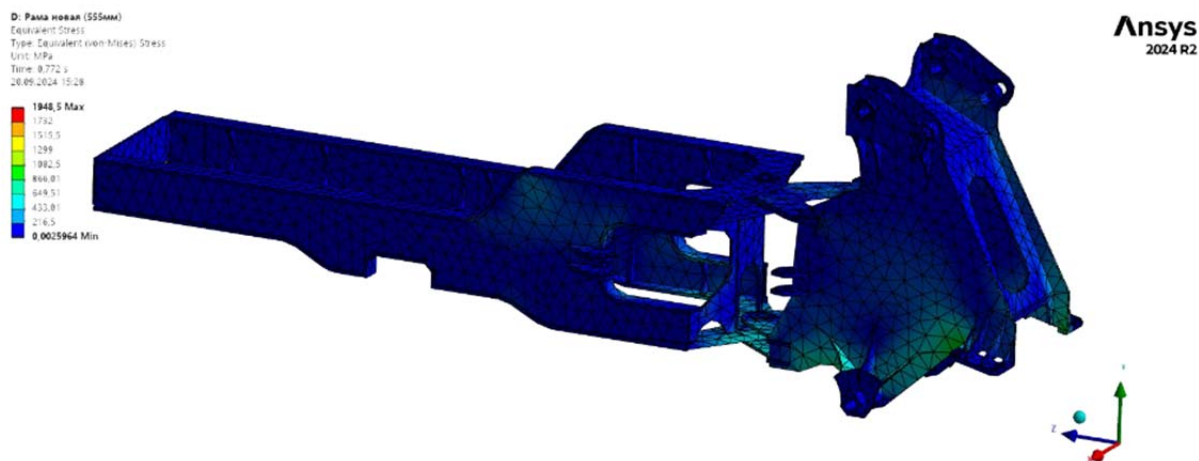


Рисунок 8 – Навантаження, які діють на раму з параметром A=555мм

Джерело: розроблено авторами

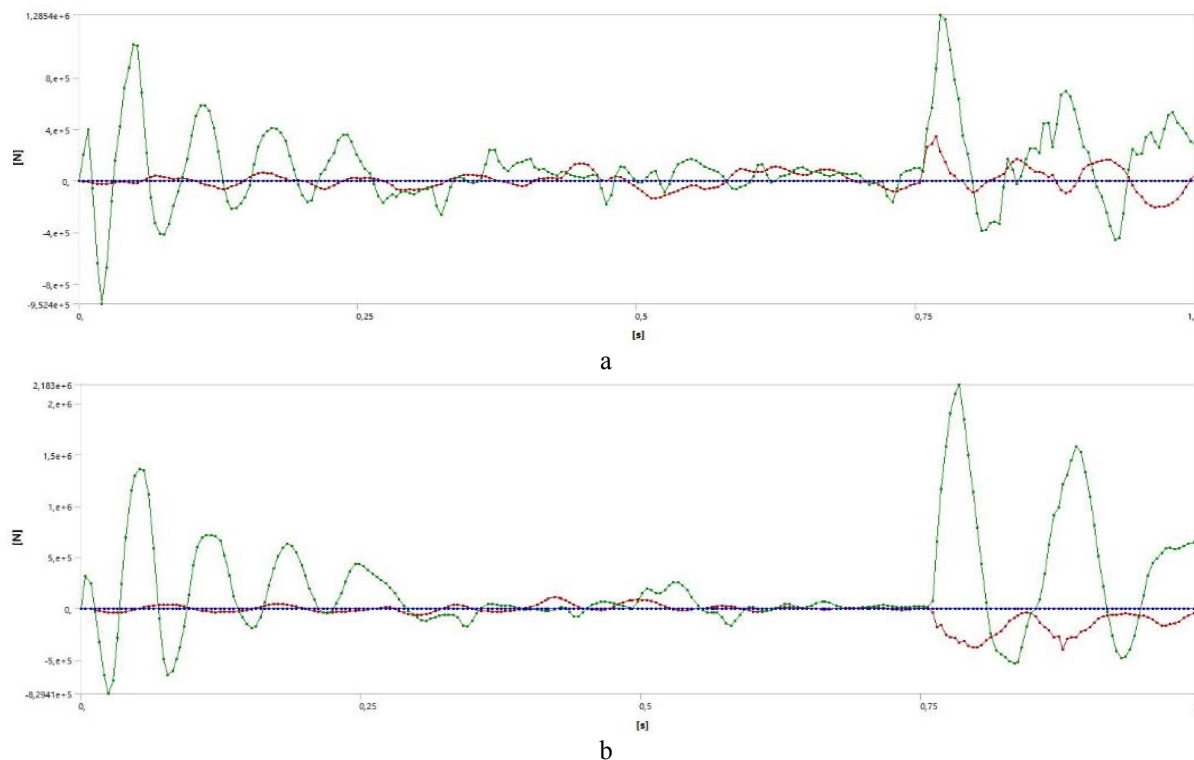


Рисунок 9 – Графіки навантаженості у просторі на верхньому (а) та нижньому (б) шарнірах  
Джерело: розроблено авторами

На графіку (рис. 10) зведено отримані результати навантаженості усіх зразків рами, з якими видно, що навантаженість несучої системи при виконанні операції набору матеріалу в ківш і зустрічі з непереборною перешкодою, має схильність до зростання відповідно до збільшення параметру А рами. Відповідно можна зазначити, що для такого випадку параметр рами А повинен бути найменшим.

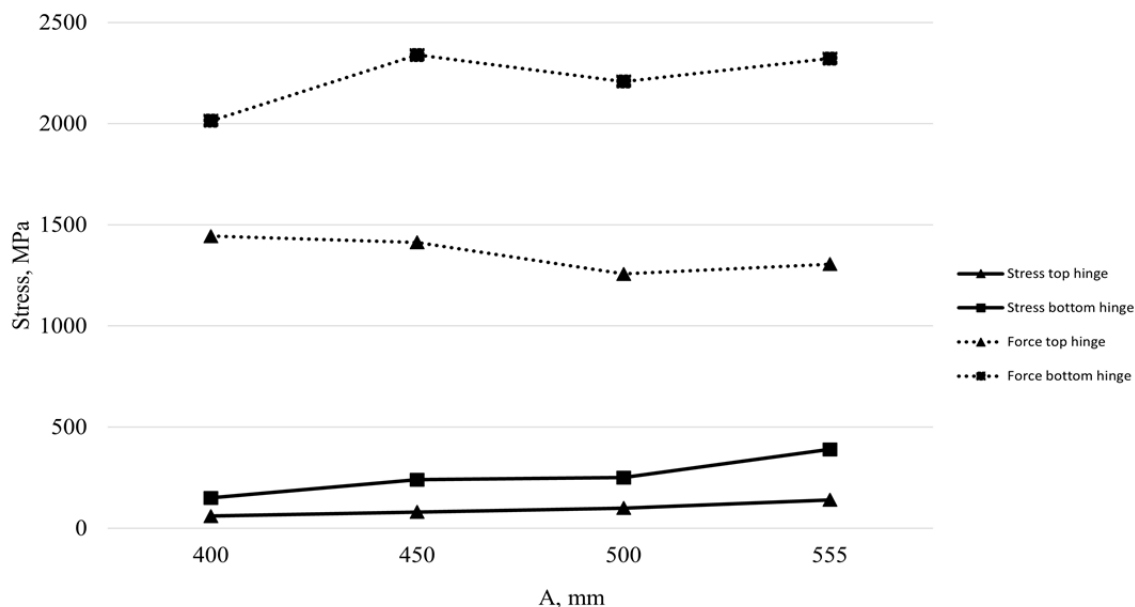


Рисунок 10 – Графік навантаженості чотирьох зразків рами з різним параметром А  
Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** Даний метод комп'ютерного моделювання робочого процесу машини дає можливість у повній мірі оцінити поведінку несучої системи чи інших елементів машини за короткий час і зробити висновки щодо слабких місць конструкції, не вдаючись до виготовлення виробу в металі та не проводячи натурних випробувань.

У подальшому слід провести аналіз при зустрічі з перешкодою центром ковша, змінити кут підйому ковша, а також дослідити робочі процеси, такі як переміщення наповненого ковша до місця розвантаження, рух навантажувача по нерівній поверхні, рух на схилі та інші для отримання повної картини навантажень при різноманітних ситуаціях. Після отримання повної картини можна зробити висновок щодо проектування несучої системи з оптимальними параметрами.

## Список літератури

1. Щербак О.В., Сумінов А.В., Хачатурян С.Л. Розробка методики проектування спеціалізованих машин на базі шарнірного тягача. *Збірник наукових праць «Вісник ХНАДУ»*. 2021. № 95. С. 32–37.
2. Щербак О.В., Рагулін В.М., Сумінов А.В. Analysis of the load-bearing system of the loader according to the results of dynamic tests in the environment of Ansys Motion. *Автомобільний транспорт*. 2022. № 51, С. 58–65.
3. Щербак О.В., Сумінов А.В., Хачатурян С.Л. Дослідження динамічних навантажень рами фронтального навантажувача з використанням комп'ютерних 3D моделей у середовищі Siemens NX. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки»*. 2023. № 7(38) Ч.ІІ, С. 104–112.
4. Щербак О.В., Сумінов А.В. Комп'ютерне моделювання несучих систем з використанням автоматизованого розрахункового комплексу ANSYS. *Конференція комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. (м. Харків, 23 листопада 2022р)*. Харків 2022, С. 41–45.
5. О.В. Єфименко, З.Р. Мусаєв, Моделювання робочих процесів однокішшових навантажувачів за допомогою «Autodesk Inventor». *Збірник наукових праць «Вісник ХНАДУ»*. 2016. № 73, С. 220–224.
6. Черніков О.В., А.І. Москаленко, О.С. Оболенський Дослідження руху фронтального навантажувача в пакеті Autodesk Inventor. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2012. № 89. С. 382–386.
7. Liang Sun. Research on Fatigue Life Prediction Method of Tractor Frame. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 5th International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. Shanghai, China. 16–18 August 2019, № 358. P. 2–6.
8. R. Rajappan, M. Vivekanandhan. Static and Modal Analysis of Chassis by Using Fea. *The International Journal of Engineering and Science*. 2013. № 2. P. 63-73.
9. Roslan Abd. Rahman Statics and dynamics structural analysis of a 4.5-ton truck chassis. *Journal Mechanical*. 2007. № 24. P. 56-67.
10. Mohd Azizi Muhammad Nora, Helmi Rashida, Wan Mohd Faizul Wan Mahyuddinb, Mohd Azuan Mohd Azlanc, Jamaluddin Mahmuda. Stress Analysis of a Low Loader Chassis. *Procedia Engineering*. 2012. № 41. P. 995-1001.
11. Hemant B. Patil, Sharad D. Kachave, Eknath R. Deore Stress Analysis of Automotive Chassis with Various Thicknesses. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013. №6. P. 44-49.
12. Roslan Abd. Rahman, Nasir Tamin. Stress analysis of heavy-duty truck chassis as a preliminary data for its fatigue life prediction using FEM. *Journal Mechanical*. 2008. № 26. P. 76-85.
13. Haval Kamal Asker, Arkan Fawzi Saeed. Stress analysis of standard truck chassis during Ramping on block using finite element method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. №. 6. P. 641–648.
14. N.K. Ingole, D.V. Bhope. Stress analysis of tractor trailer chassis for self weight reduction. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. № 9. P. 7218–7225.
15. Jing Yinghao. Finite Element Analysis and Optimization of Medium Truck Frame Based on ANSYS. 2023. *Journal of Engineering Research and Reports*. № 10. P. 13-22.
16. Gillespie, T.D., Karamihas, S.M., Simplified models for truck dynamic response to road inputs. 2000. *Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design*. № 1. P. 52–63.

## References

1. Sherbak O.V., Suminov A.V., Hachaturyan S.L. (2021). Rozrobka metodiki proyektuvannya specializovanih mashin na bazi sharnirnogo tyagacha. *Zbirnik naukovih prac «Visnik HNADU»*. № 95. P. 32–37. [in Ukrainian].
2. Sherbak O.V., Ragulin V.M., Suminov A.V. (2022). Analysis of the load-bearing system of the loader according to the results of dynamic tests in the environment of Ansys Motion. *Avtomobilnij transport*. № 51. P. 58–65. [in Ukrainian].
3. Sherbak O.V., Suminov A.V., Hachaturyan S.L. (2023). Doslidzhennya dinamichnih navantazhen rami frontalnogo navantazhuvacha z vikoristannyam komp'yuternih 3D modelej u seredovishi Siemens NX. *Zbirnik naukovih prac «Centralnoukrayinskij naukovij visnik. Tehnichni nauki»*. № 7(38) Ch.II. P. 104–112. [in Ukrainian].
4. Sherbak O.V., Suminov A.V. Komp'yuterne modelyuvannya nesuchih sistem z vikoristannyam avtomatizovanogo rozrahunkovogo kompleksu ANSYS. *Konferenciya komp'yuterno-integrovanij tehnologiyi avtomatizaciyi tehnologichnih procesiv na transporti ta u virobniectvi: tezi dop. vseukr. nauk.-prakt. konf. (m. Harkiv, 23 listopada 2022r)*. Harkiv 2022. P. 41–45. [in Ukrainian]
5. O.V. Yefimenko, Z.R. Musayev. (2016) Modelyuvannya robochih procesiv odnokivshovih navantazhuvachiv za dopomogoyu «Autodesk Inventor». *Zbirnik naukovih prac «Visnik HNADU»*. № 73. P. 220–224. [in Ukrainian].
6. Chernikov O.V., A.I. Moskalenko, O.S. (2012). Obolenskij Doslidzhennya ruhu frontalnogo navantazhuvacha v paketi Autodesk Inventor. *Prikladna geometriya ta inzhenerna grafika*. № 89. P. 382–386. [in Ukrainian].
7. Liang Sun. Research on Fatigue Life Prediction Method of Tractor Frame. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 5th International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. Shanghai, China. 16–18 August 2019, № 358. P. 2–6.
8. R. Rajappan, M. (2013). Vivekanandhan. Static and Modal Analysis of Chassis by Using Fea. *The International Journal of Engineering and Science*. № 2. P. 63–73.
9. Roslan Abd. Rahman Statics and dynamics structural analysis of a 4.5-ton truck chassis. *Journal Mechanical*. 2007. № 24. P 56–67.
10. Mohd Azizi Muhammad Nora, Helmi Rashida, Wan Mohd Faizul Wan Mahyuddinb, Mohd Azuan Mohd Azlanc, Jamaluddin Mahmuda. *Stress Analysis of a Low Loader Chassis. Procedia Engineering*. 2012. № 41. P. 995–1001.
11. Hemant B. Patil, Sharad D. Kachave, Eknath R. (2013). Deore Stress Analysis of Automotive Chassis with Various Thicknesses. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. №6. P. 44–49.
12. Roslan Abd. Rahman, Nasir Tamin. Stress analysis of heavy-duty truck chassis as a preliminary data for its fatigue life prediction using FEM. *Journal Mechanical*. 2008. № 26. P. 76–85.
13. Haval Kamal Asker, Arkan Fawzi Saeed. Stress analysis of standard truck chassis during Ramping on block using finite element method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. №. 6. P. 641–648.
14. N.K. Ingole, D.V. Bhope. (2011). Stress analysis of tractor trailer chassis for self-weight reduction. *International Journal of Engineering Science and Technology*. № 9. P. 7218–7225.
15. Jing Yinghao. Finite Element Analysis and Optimization of Medium Truck Frame Based on ANSYS. 2023. *Journal of Engineering Research and Reports*. № 10. P. 13–22.
16. Gillespie, T.D., Karamihas, S.M., Simplified models for truck dynamic response to road inputs. 2000. *Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design*. № 1. P. 52–63.

**Oleh Sherbak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Suminov**, assistant

*Kharkiv National Automobile Highway University, Kharkiv, Ukraine*

**Serhiy Khachaturian**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

## Study of the Loads of the Load-carrying System Depending on the Parameters of the Hinged Connection of the Half-frames

This work is the first part of a series of studies of the hinge joint of the bearing system of a front loader with a lifting capacity of 3 tons. For comparison, the concept of building a frame of Western manufacturers with approximately the same load capacity was chosen and a 3D model of the new frame was created in four to three variants with different sizes of the connecting hinge. The situation when a forklift encounters an insurmountable obstacle while picking up material in a bucket is considered. The loads at the upper and lower joints of the half-frames and the load of the entire frame were analyzed. The calculations were performed in dynamics using the Ansys software package for engineering analysis and numerical modeling using the Motion calculation module. The same conditions (boom position, time and speed of movement) were taken as the initial data for all

prototypes of the new bearing system. Computer modeling allows us to simulate various scenarios of the loader's load-bearing system behavior during the work process in a short time. In this way, we get results that can be used to identify design weaknesses and make changes at the design stage, and we save material, time, and money for the production of the first samples of new equipment.

This method of computer simulation of machine operating processes allows a complete assessment of the behavior of the supporting system and other elements of the machine and draw conclusions about design flaws in a short time, without manufacturing a metal product and conducting full-scale tests.

In addition, it is necessary to obtain a general understanding of the loads in various situations, for example, when the center of the bucket comes into contact with an obstacle, when the angle of the bucket is changed, when moving a full bucket to a dump point, when driving the loader on an uneven surface, when driving on a slope, and others work processes. Further analysis should be carried out to obtain an overall picture of the loads in various situations, such as when moving the forklift to the unloading point, when moving the forklift on uneven ground, when driving on a slope and during other work processes. After obtaining the overall picture, you can begin to design a supporting system with optimal parameters.

**loading, CAD, CAE, Solidworks, Ansys, bearing system, dynamics, hinged frame, strength**

*Одержано (Received) 12.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 621.664**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.119-132](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.119-132)

**Ю.В. Кулешков**, проф., д-р. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Є.Ю. Штомпель**, асп.

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

*e-mail: rudenkotv@kntu.kr.ua*

## Вдосконалення математичної моделі зубчатого зачеплення шестеренного насоса мобільної техніки

У даній статті пропонується вдосконалена математична модель роботи зубчатого зачеплення шестеренних гідромашин, яка базується на тому, що швидкості обертання шестерень і радіуси, що з'єднують осі обертання з точкою зачеплення зубів, є різними. Це пояснюється тим, що зуби шестерень, маючи евольвентний профіль, мають певне проковзування при русі один по одному.

Врахування цього фактору є важливим кроком у розвитку теорії шестеренних гідромашин. Це дозволить створити математичні моделі, які зможуть пояснити такі специфічні явища, як пульсація тиску і подачі, рух рідини у відсіченій порожнині, характер зміни навантаження на підшипники насоса та мотора, а також пульсацію крутного моменту в шестеренних гідромоторах. Цей новий підхід може суттєво вплинути на розробку більш ефективних і надійних гідромашин.

**евольвентні профілі зубів, ковзання евольвентних поверхонь, шестеренний насос**

**Постановка проблеми.** Широке застосування шестеренних гідромашин в гідравлічних системах пояснюється простотою і компактністю їх конструкції, надійністю, малою трудомісткістю і низькою собівартістю виготовлення, зручністю обслуговування, можливістю безпосереднього їх з'єднання з приводними механізмами. Подальше підвищення технічного рівня шестеренних гідромашин неможливе без подальших теоретичних та експериментальних досліджень. А тому, дана робота, присвячена одному з недостатньо вивчених теоретичних аспектів функціонування гідромашин, безсумнівно, є актуальною.

© Ю.В. Кулешков, Т.В. Руденко, М.В. Красота, Є.Ю. Штомпель, 2024

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Незважаючи на багаторічну історію розвитку шестеренних гідромашин та масу публікацій з цієї проблеми, досі залишаються не поясненими ряд особливостей їхньої роботи. Дослідники досі не можуть пояснити і встановити причинно - наслідковий зв'язок ряду особливостей роботи шестеренних гідромашин. До цих особливостей слід віднести: утворення і зміну геометричних параметрів відсіченої порожнини, зменшення робочого об'єму в порівнянні з очікуваним значенням, причини виникнення пульсації подачі і тиску, пульсуючу зміну крутного моменту шестеренного гідромотора.

Пульсація потоку рідини, що подається насосом за один оберт, відбувається з частотою, що дорівнює кількості зубів ведучої шестерні. Пульсація подачі повторюється при повороті шестерень на кут, що відповідає одному кутовому кроку, а амплітуда пульсації залежить від кута зачеплення та числа зубів.

У дисертаційній роботі Суреша Бебі Касарагадда, виконаної у Вищій школі Університету Міссурі-Колумбія (США) під керівництвом доктора Noah D. Manring [2] приділено велику увагу теоретичним дослідженням пульсації подачі робочої рідини шестеренного насоса становить  $\sigma_{np} = 63,0\%$ . Із збільшенням числа зубів ведучої шестерні пульсація зменшується, досягаючи значення  $\sigma_{np} = 28,0\%$ .

Публікація Го Яо Хуана та Чі Чі Чена, які представляють Інженерно-механічний факультет, Чунг Хуа університету № 707 у м. Сінчжу, Тайвань, присвячена кінематичній оптимізації подачі шестеренного насоса зовнішнього зачеплення. Але багато уваги приділено також дослідженню пульсації подачі. Так величина пульсації подачі від кута повороту шестерень та від коефіцієнта висоти головки зуба становить [3].

Особливий інтерес представляють результати досліджень пульсації подачі, представлені Paolo Casoli, Andrea Vacca та Germano Franzoni у статті [4, 5]. Особливістю цієї статті є ретельний аналіз одержаних результатів теоретичних досліджень та їх перевірка експериментальними дослідженнями. Особливістю теоретичних досліджень стало те, що математичну модель процесу подачі моделювали в спеціальному програмному середовищі. Після чого отримані результати перевіряли експериментально. До недоліків відомих теоретичних досліджень слід віднести той факт, що в жодному з цих джерел не зроблено спроби пояснити причини або механізм пульсації подачі та тиску робочої рідини в шестеренному насосі. Винятком з цього з'явилися роботи автора [6, 7], в яких явище пульсації пояснюється тим, що сума квадратів радіусів, що з'єднують центри обертання шестерень з точкою зачеплення зубів шестерень на лінії зачеплення, змінюється за параболічною залежністю від кута повороту шестерень.

На даний момент у літературних джерелах не враховувалася особливість роботи евольвентного зубчастого зачеплення, яка полягає в тому, що між евольвентами профілями зубів шестерень відбувається ковзання на всьому протязі зачеплення. І, лише у єдиній точці зубчастого зачеплення – у полюсі - ковзання переходить у кочення [8].

Результати досліджень, викладені у статті, мають стати базовими для подальшого розвитку теорії шестеренних гідромашин. Основні напрями цих теоретичних досліджень такі:

- дослідження характеру подачі з урахуванням вищевикладених особливостей у роботі шестеренних гідромашин;
- дослідження особливостей зміни відсіченої порожнини та гідродинамічних процесів, що відбуваються в ній;
- дослідження пульсації подачі та тиску;

- дослідження динаміки навантаження на підшипники насоса та мотора;
- дослідження динаміки крутного моменту, що розвивається шестеренний гідромотор;
- дослідження динаміки потужності, що розвивається шестеренним гідромотором.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є:

- встановлення взаємозв'язку між кутом повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  і кутами повороту  $\chi_1, \chi_2$ , радіусів  $\rho_1, \rho_2$ , що з'єднують осі обертання шестерень  $O_1$  і  $O_2$  з точкою зачеплення  $T$  з урахуванням просковзування евольвентних профілів зубів шестерень, один щодо одного;
- визначення закономірності зміни довжин радіусів  $\rho_1, \rho_2$ , від параметра  $\varphi_1$ .

**Викладення основного матеріалу.** Мета дослідження, полягає у встановленні згаданих вище аналітичних залежностей, була досягнута шляхом використання традиційного математичного апарату: геометрії, тригонометрії та теорії евольвентного зубчастого зачеплення.

В якості геометричної інтерпретації зубчастого зачеплення представимо зуби шестерень у вигляді системи пластин  $O_1A_1, O_2A_2, O_1T$  та  $O_2T$  (рис. 1 - 4).

На рис. 1 представлена схема зубчастого зачеплення шестеренної гідромашини в момент вступу в зачеплення нової пари зубів, на рис. 2 - схема зубчастого зачеплення в поточний момент часу, на рис. 3 - схема зубчастого зачеплення в момент, коли зачеплення зубів відбувається в полюсі, на рис. 4 - схема зубчастого зачеплення у момент виходу першої пари зубів із зачеплення.

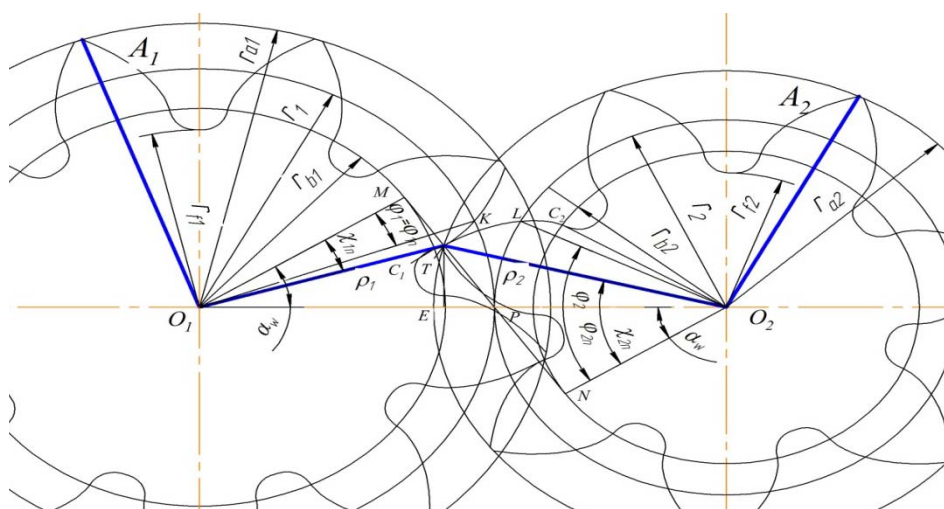


Рисунок 1 – Схема початку зачеплення пари зубів

*Джерело: розроблено авторами*

При розробці пропонованої математичної моделі шестеренної гідромашини за початок відліку приймемо радіус  $OM$  для визначення кутів повороту елементів провідної шестерні,  $ON$  радіус веденої шестерні.

Для ведучої шестерні за центр її обертання приймемо точку  $O_1$ . При цьому, за додатній напрямок приймемо обертання радіусу за годинниковою стрілкою.

Для веденої шестерні за центр її обертання приймемо точку  $O_2$ , при цьому, за додатній напрямок приймемо обертання радіусу проти годинникової стрілки.

Система відліку обрана таким чином, що кути повороту ведучої та веденої шестерень  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  від початку до кінця зубчатого зачеплення (рис. 1-4) будуть додатними, незважаючи на те, що шестерні обертаються в протилежні сторони. Це пояснюється тим, що об'єм робочої рідини є скалярною величиною і може бути тільки додатнім.

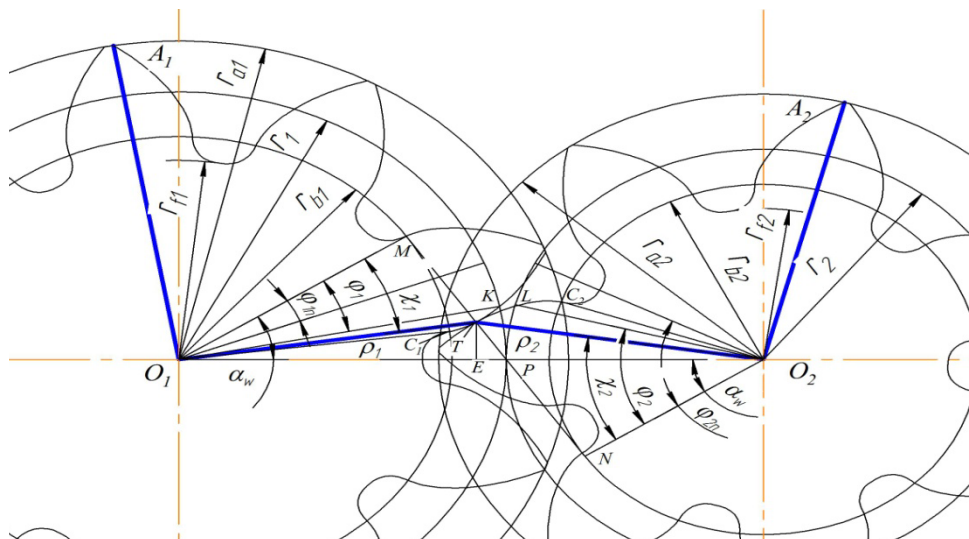


Рисунок 2 – Схема положення елементів зубчатого зачеплення в поточний момент часу  
Джерело: розроблено авторами

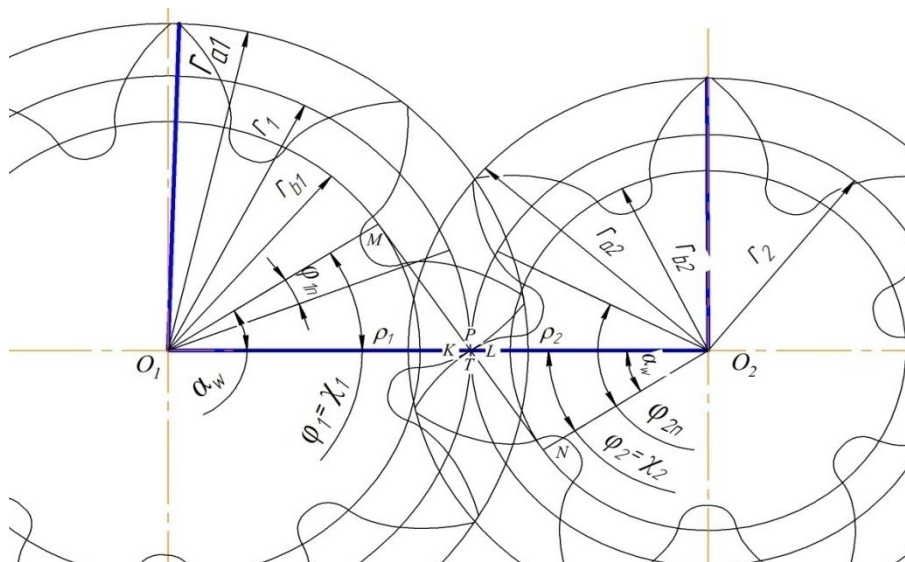


Рисунок 3 – Схема положення зубів полюсі зачеплення  
Джерело: розроблено авторами

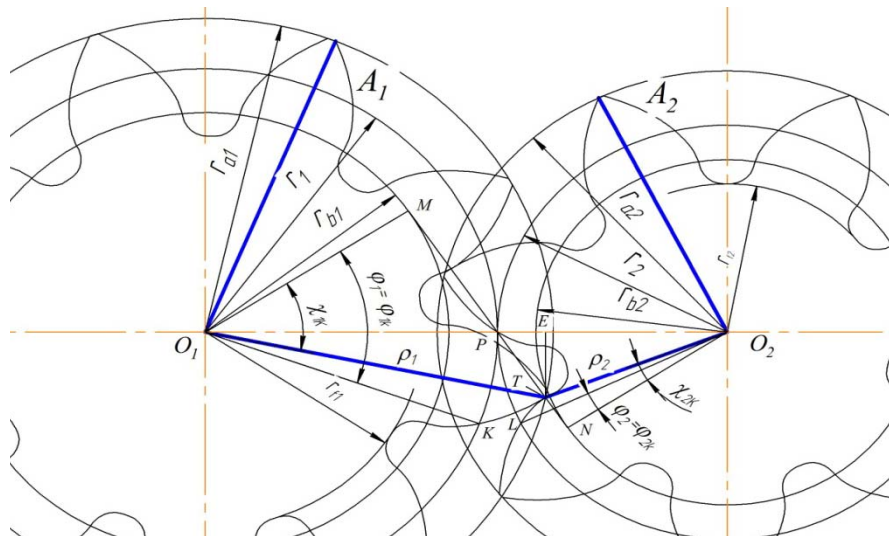


Рисунок 4 – Схема моменту закінчення зачеплення пари зубів

Джерело: розроблено авторами

Наведемо опис пропонованої геометричної моделі зубчатого зачеплення шестеренної гідромашини.

1. На рис. 1 – 4, представлені такі елементи зубчатого зачеплення шестерень та їх взаємозв'язку:

$MN$  - лінія зачеплення зубів;

$P$  - полюс зачеплення;

$\angle MO_1P = \angle NO_2P = \alpha_w$  - кут зачеплення;

$O_1A_1 = r_{a1}$ ,  $O_2A_2 = r_{a2}$  - радіуси вершин провідної та веденої шестерень відповідно;

$O_1T = \rho_1$ ,  $O_2T = \rho_2$  - радіуси, що проведені з центрів обертання  $O_1$  і  $O_2$  шестерень в поточну точку  $T$  зачеплення евольвентних профілів на лінії зачеплення  $MN$ ;

$PT = x$  - відстань від полюса  $P$  до точки зачеплення зубів  $T$  на лінії зачеплення;

$O_1C_1$ ,  $O_2C_2$  - радіуси, проведені з центру обертання шестерень у точки перетину основних кіл з евольвентними профілями;

$TE$  - висота трикутника  $O_1O_2T$ ;

$r_{b1}$ ,  $r_{b2}$  - радіуси основних кіл відповідно ведучої і веденої шестерні;

$r_1$ ,  $r_2$  - радіуси початкових кіл відповідно ведучої і веденої шестерні;

$r_{f1}$ ,  $r_{f2}$  - радіуси окружностей западин відповідно ведучої та веденої шестерень;

$O_1K = r_1$ ,  $O_2L = r_2$  - радіуси, проведені з центрів обертання шестерень, які перекочуються без ковзання, в точку перетину робочої сторони евольвентного профілю з початковим колом;

$\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  - поточні кути повороту ведучої та веденої шестерні при відліку від радіусів  $OM$  - для ведучої та  $ON$  - для веденої шестерні.

Між збільшенням кута повороту ведучої шестерні  $\Delta\varphi_1$  і збільшенням кута повороту веденої шестерні  $\Delta\varphi_2$  існує залежність:

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_1 / i, \quad (1)$$

де  $i$  - передаточне число зубчатої передачі,  $i = z_2 / z_1 = r_2 / r_1 = \omega_2 / \omega_1 = n_2 / n_1$ ;

$z_1, z_2$  - число зубів ведучої та веденої шестерні;

$r_1, r_2$  - радіуси початкових кіл ведучої і веденої шестерні;

$\omega_1, \omega_2$  - кутові швидкості обертання ведучої а веденої шестерні;

$n_1, n_2$  - частота обертання ведучої та веденої шестерні;

$\varphi_{1n}, \varphi_{2n}$  и  $\varphi_{1k}, \varphi_{2k}$  - початкові і кінцеві кути повороту ведучої і веденої шестерні на початку і в кінці зачеплення, при відліку від радіусів  $OM$  - для ведучої  $ON$  – для веденої шестерні;

$\chi_{1n}, \chi_{2n}$  та  $\chi_{1k}, \chi_{2k}$  - початкові та кінцеві кути повороту радіусів  $O_1T = \rho_1$ ,  $O_2T = \rho_2$ , Проведених з центрів обертання шестерень  $O_1$  і  $O_2$  в поточну точку  $T$  зачеплення евольвентних профілів на лінії зачеплення.

Слід при цьому враховувати, що ведена шестерня обертається в протилежний бік щодо ведучої та кутові координати повороту веденої та ведучої шестерень мають різні точки відліку. На цьому ми зупинимось трохи згодом.

Далі, використовуючи схеми зубчатого зачеплення, представлені на рис. 1 – 4, покажемо відмінності у обертальному русі радіусів  $O_1K$  і  $O_2L$  та радіусів  $O_1T = \rho_1$  і  $O_2T = \rho_2$ . Як бачимо із рис. 1 – 4 радіуси  $O_1K$  і  $O_2L$ , безпосередньо пов'язані з початковим колом і рухаються разом із шестернями без проковзування. Радіуси ж  $O_1T = \rho_1$  і  $O_2T = \rho_2$ , пов'язані з точкою зачеплення і беруть участь у обертальному русі з проковзуванням евольвентних профілів шестерень. У цьому полягає відмінність у русі зазначених радіусів.

На рис. 1 представлено початок зубчастого зачеплення і радіус  $O_1K$  повернутий щодо радіуса  $O_1M$  на кут  $\varphi_{1n}$ , а радіус  $O_1T = \rho_1$  на кут  $\chi_{1n}$ . Відповідно для веденої шестерні радіус  $O_2L$  повернутий щодо радіуса  $O_1N$  на кут  $\varphi_{2n}$ , а радіус  $O_2T = \rho_2$  на кут  $\chi_{2n}$ . З рис.1 бачимо, що радіус  $O_1T = \rho_1$  у своєму обертанні випереджає радіус  $O_1K$  і різниця кутів їхнього повороту становить  $\chi_{1n} - \varphi_{1n}$ . Аналогічно і для веденої шестерні радіус  $O_2T = \rho_2$  у своєму обертанні випереджає радіус  $O_2L$  і різниця кутів їхнього повороту становить  $\chi_{2n} - \varphi_{2n}$ .

Простежуючи далі обертання цих радіусів із рис. 2 бачимо, що різниця кутів  $\chi_1 - \varphi_1$  та  $\chi_2 - \varphi_2$  скоротилася. А на рис. 3 бачимо момент, що точки  $K, T, L, T$ , одночасно прийшли в полюс зачеплення точку  $P$ . При цьому радіуси  $O_1K$ ,  $O_1T = \rho_1$ , і радіуси  $O_2L$ ,  $O_2T = \rho_2$  збіглися і лежать на міжцентровій лінії, а різниця кутів  $\chi_1 - \varphi_1 = 0$ ,  $\chi_2 - \varphi_2 = 0$ . Це говорить про те, що кутова швидкість обертання радіусів  $O_1K$  і  $O_2L$  більша кутової швидкості обертання радіусів  $O_1T = \rho_1$  і  $O_2T = \rho_2$ , що пояснюється, як зазначено вище, проковзуванням евольвентних профілів зубів шестерень. Ця тенденція зберігається і при подальшому обертанні шестерень, що наочно представлено на рис. 4.

Однак, вихідні передумови, полягають в тому, що кут повороту радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$  жорстко пов'язаний з кутом повороту ведучої  $\varphi_1$  та веденої шестерні  $\varphi_2$  в роботі [2] є помилковим.

Знайдемо взаємозв'язок між кутом повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  та кутами повороту радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$ . Такий взаємозв'язок можна отримати з визначення евольвенти [5, 15]

Виходячи із схем (рис. 1 - 4), для ведучої шестерні можна записати вираз з врахуванням поняття інволюти кута:

$$\chi_1 = \varphi_1 + \text{inv}\alpha_w - \text{inv}\chi_1; \quad (2)$$

$$\chi_1 = \arctg(\varphi_1 + \text{tg}\alpha_w - \alpha_w) \text{ або } \chi_1 = \arctg(\varphi_1 + \text{inv}\alpha_w) \quad (3)$$

З (3) отримаємо і залежність  $\varphi_1$  от  $\chi_1$ :

$$\varphi_1 = \text{tg}\chi_1 - \text{tg}\alpha_w + \alpha_w \text{ или } \varphi_1 = \text{tg}\chi_1 - \text{inv}\alpha_w. \quad (4)$$

Аналогічно, встановимо залежність між кутами  $\chi_2$  і  $\varphi_2$ . З рис. 1 – 4 можемо записати наступну залежність:

$$\chi_2 = \arctg(\varphi_2 + \text{tg}\alpha_w - \alpha_w) \text{ або } \chi_2 = \arctg(\varphi_2 + \text{inv}\alpha_w). \quad (5)$$

З (5) можемо отримати залежність  $\varphi_2$  від  $\chi_2$ :

$$\varphi_2 = \text{tg}\chi_2 - \text{tg}\alpha_w + \alpha_w \text{ або } \varphi_2 = \text{tg}\chi_2 - \text{inv}\alpha_w. \quad (6)$$

Була отримана залежність кута  $\chi_2$  (5) від змінної  $\varphi_2$ , що дещо незручно. Знайдемо залежність кута  $\chi_2$  від змінної  $\varphi_1$ , тобто залежність виду  $\chi_2(\varphi_1)$ . Для цього скористаємось поняттям передаточного відношення.

З вище наведеного поняття (1) і рис. 1 – 4 бачимо, що

$$\angle LO_2P = \angle KO_1P / i. \quad (7)$$

При цьому,

$$\angle KO_1P = \alpha_w - \varphi_1, \quad (8)$$

$$\varphi_2 = \alpha_w + \angle LO_2P. \quad (9)$$

Тоді, з врахуванням виразів (7) і (8) отримаємо

$$\varphi_2(\varphi_1) = \alpha_w + (\alpha_w - \varphi_1) / i. \quad (10)$$

Для зачеплення з однаковим числом зубів  $i = 1$ , а тому

$$\varphi_2(\varphi_1) = 2\alpha_w - \varphi_1. \quad (11)$$

Тоді, залежність (5) можна представити для загального випадку у вигляді:

$$\chi_2(\varphi_1) = \arctg[(\alpha_w - \varphi_1) / i + \text{tg}\alpha_w] \text{ або } \chi_2(\varphi_1) = \arctg[\alpha_w + (\alpha_w - \varphi_1) / i + \text{inv}\alpha_w]. \quad (12)$$

Для шестерень з однаковим числом зубів  $i = 1$  і залежності (12), можна записати у вигляді:

$$\chi_2(\varphi_1) = \arctg(\alpha_w - \varphi_1 + \text{tg}\alpha_w) \text{ або } \chi_2(\varphi_1) = \arctg[2\alpha_w - \varphi_1 + \text{inv}\alpha_w]. \quad (13)$$

Можуть бути корисними і залежності кутів повороту  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  та радіусів  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , від положення точки зачеплення зубів  $T$  на лінії зачеплення  $MN$ , яке визначається відстанню -  $x$  точки  $T$  від полюса зачеплення  $P$ .

З прямокутного  $\triangle MO_1T$  на рис. 1, 2 можемо записати, що

$$MT = r_{b1} \operatorname{tg} \chi_1, \quad (14)$$

звідки

$$\chi_1 = \arctg(MT / r_{b1}). \quad (15)$$

З іншої сторони, з прямокутного  $\triangle MO_1P$  (рис. 1, 2) можемо записати

$$MT = r_{b1} \operatorname{tg} \alpha_w - TP = r_{b1} \operatorname{tg} \alpha_w - x. \quad (16)$$

Підставимо в (15) значення  $MT$  з (16), отримаємо вираз для кута  $\chi_1$  від  $x$

$$\chi_1 = \arctg((r_{b1} \operatorname{tg} \alpha_w - x) / r_{b1}). \quad (17)$$

Підставимо (17) в вираз (4), отримаємо після перетворень залежність кута  $\varphi_1$  від  $x$

$$\varphi_1 = \alpha_w - x / r_{b1}. \quad (18)$$

Також, можна отримати залежність кута повороту веденої шестерні  $\varphi_2$  від  $x$ .

З прямокутного  $\triangle NO_2T$  (рис. 1, 2), можемо записати

$$NT = r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_w + x \quad (19)$$

та

$$\operatorname{tg} \chi_2 = NT / r_{b2}. \quad (20)$$

З (20) випливає, що

$$\chi_2 = \arctg(NT / r_{b2}). \quad (21)$$

Підставимо в (21) значення  $NT$  з (19), отримаємо

$$\chi_2 = \arctg((r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_w + x) / r_{b2}). \quad (22)$$

Підставимо (22) в (5), після відповідних перетворень, отримаємо залежність кута повороту веденої шестерні від  $x$

$$\varphi_2 = \alpha_w + x / r_{b2}. \quad (23)$$

Відмітимо, що аналогічний результат можна отримати з залежностей (11) і (18).

З виразів (18) і (23) можна отримати і зворотні залежності виду:

$$x = r_{b1}(\alpha_w - \varphi_1); \quad (24)$$

$$x = r_{b2}(\varphi_2 - \alpha_w) = r_{b2}(\alpha_w - \varphi_1) / i. \quad (25)$$

Перш ніж перейти до дослідження отриманих виразів відмітимо, що графіки досліджуваних залежностей побудовані для зубчатих зачеплень з різними параметрами, але розрахованими на базі насосів типу GP3K32. Вибір даного насоса пояснюється тим, що це найбільш масовий тип, що випускається промисловістю України, що є базовим варіантом виконання шестеренного насосу (НШ), а його зубчасте зачеплення є типовим представником для НШ. Параметри досліджуваних зубчатих зачеплень НШ представлені в табл. 1.

Далі, визначимо область зміни аргументу  $\varphi_1$ . Виходячи з геометричної моделі подачі робочої рідини, представленої на рис. 1 – 4, можна стверджувати, що область зміни аргументу за цикл зачеплення однієї пари зубів може бути визначений як:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= [(\alpha_w - \pi \cdot \varepsilon / z_1); (\alpha_w + \pi \cdot \varepsilon / z_1)]; \\ \varphi_2 &= [(\alpha_w + \pi \cdot \varepsilon / z_2); (\alpha_w - \pi \cdot \varepsilon / z_2)],\end{aligned}\quad (26)$$

де  $z_1, z_2$  - відповідно число зубів ведучої і веденої шестерні;

$\varepsilon$  - коефіцієнт перекриття зубчатого зачеплення шестерень.

Межі зміни кутів повороту ведучої і веденої шестерні для зубчатих зачеплень з різними параметрами наведеними в табл. 2

Таблиця 1 – Технічні параметри зубчатих зачеплень насосів типу GP3K32

| Назва параметру                                           | Значення параметру, при |                 |                 |                  |                  |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
|                                                           | $z_1 = z_2 = 8$         | $z_1 = 9$       | $z_2 = 7$       | $z_1 = 7$        | $z_2 = 9$        |
| Число зубів шестерень, $z$                                | 8                       | $z_1 = 9$       | $z_2 = 7$       | $z_1 = 7$        | $z_2 = 9$        |
| Модуль зубчатого зачеплення $m$ , мм                      | 5                       |                 |                 |                  |                  |
| Кут вихідного профіля $\alpha$ , град                     | $20^\circ$              |                 |                 |                  |                  |
| Діаметр основного кола $d_b$ , мм                         | 37,588                  | $d_{b1} = 42,3$ | $d_{b2} = 32,8$ | $d_{b1} = 32,83$ | $d_{b2} = 42,29$ |
| Діаметр вершин зубів шестерень $d_a$ , мм                 | 55,0                    | $d_{a1} = 60$   | $d_{a2} = 50$   | $d_{a1} = 50$    | $d_{a2} = 60$    |
| Кут зачеплення $\alpha_w$ , град                          | 33,355                  |                 |                 |                  |                  |
| Міжцентрова відстань, $a_w$ , мм                          | 45,0                    |                 |                 |                  |                  |
| Товщина зуба шестерні при вершині зуба $S_a$ , мм         | 1,0                     |                 |                 |                  |                  |
| Довжина більшої вісі НШ $G$ , мм                          | 100,0                   |                 |                 |                  |                  |
| Коефіцієнт перекриття зубчатого зачеплення, $\varepsilon$ | 1,044                   | 1,030           | 1,032           |                  |                  |

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Інтервали зміни кутів повороту ведучої і веденої шестерні і радіусів  $\rho_1$  і

$\rho_2$

| Параметри зубчатого зачеплення                | Інтервал зміни кутів                                                                   |                                                                                        |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                               | Ведучої і веденої шестерні                                                             | радіусів $\rho_1$ і $\rho_2$                                                           |
| 1. $z_1 = z_2 = 8$ ,<br>$\varepsilon = 1,044$ | $\varphi_1 \in [9,86^\circ; 56,84^\circ]$<br>$\varphi_2 \in [56,84^\circ; 9,86^\circ]$ | $\chi_1 \in [13,936^\circ; 46,886^\circ]$<br>$\chi_2 \in [46,886^\circ; 13,936^\circ]$ |

|                                                      |                                                                           |                                                                        |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 2. $z_1 = 9 \quad z_2 = 7,$<br>$\varepsilon = 1,030$ | $\varphi_1 \in [12,75^0; 53,95^0]$<br>$\varphi_2 \in [59,836^0; 6,864^0]$ | $\chi_1 \in [16,695^0; 45,502^0]$<br>$\chi_2 \in [48,25^0; 11,082^0]$  |
| 3. $z_1 = 7 \quad z_2 = 9,$<br>$\varepsilon = 1,032$ | $\varphi_1 \in [6,813^0; 59,887^0]$<br>$\varphi_2 \in [53,99^0; 12,71^0]$ | $\chi_1 \in [11,032^0; 48,272^0]$<br>$\chi_2 \in [45,521^0; 16,588^0]$ |

Джерело: розроблено авторами

Іншими словами, можна записати кутові координати початку та кінця зубчатих зачеплень. Кути повороту ведучої і веденої шестерень відносно радіусів  $O_1M$  і  $O_2N$  відповідно (рис. 1 - 4) будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned}\varphi_{1n} &= \alpha_w - \pi \cdot \varepsilon / z_1 ; \\ \varphi_{1k} &= \alpha_w + \pi \cdot \varepsilon / z_1 ; \\ \varphi_{2n} &= \alpha_w + \pi \cdot \varepsilon / z_2 ; \\ \varphi_{2k} &= \alpha_w - \pi \cdot \varepsilon / z_2 ;\end{aligned}\quad (27)$$

де  $z_1, z_2$  - відповідно число зубів ведучої та веденої шестерні;

$\varepsilon$  - коефіцієнт перекриття зубчатого зачеплення шестерні.

Маючи залежності (3) і (13) виду  $\chi_1(\varphi_1)$  та  $\chi_2(\varphi_1)$  можна, отримати залежності кутів повороту радіусів  $\rho_1$  та  $\rho_2$  відносно радіусів  $O_1M$  и  $O_2N$ , відповідно (рис. 1 –4):

$$\begin{aligned}\chi_{1n} &= \arctg(\tg \alpha_w - \pi \cdot \varepsilon / z_1 ); \\ \chi_{1k} &= \arctg(\tg \alpha_w + \pi \cdot \varepsilon / z_1 ); \\ \chi_{2n} &= \arctg(\tg \alpha_w + \pi \cdot \varepsilon / z_2 ); \\ \chi_{2k} &= \arctg(\tg \alpha_w - \pi \cdot \varepsilon / z_2 ).\end{aligned}\quad (28)$$

Далі, знайдемо залежності довжин радіусів  $\rho_1$  та  $\rho_2$  від положення точки зачеплення на лінії зачеплення  $MN$  і від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi$ . Це положення можна визначити лінійною координатою на лінії зачеплення  $MN$  -  $x = PT$  [3, 4].

З рис. 1–4, скориставшись теоремою Піфагора, можна записати:

$$\begin{aligned}\rho_1^2 &= (r_{b1} \tg \alpha_w - x)^2 + r_{b1}^2 ; \\ \rho_2^2 &= (r_{b2} \tg \alpha_w + x)^2 + r_{b2}^2 .\end{aligned}\quad (29)$$

Підставимо значення  $x$  від  $\varphi_1$  з (24) та (25) в (29) відповідно, після незначних перетворень, отримаємо:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= r_{b1} \sqrt{(\tg \alpha_w - \alpha_w + \varphi_1)^2 + 1} ; \\ \rho_2 &= r_{b2} \sqrt{(\tg \alpha_w + \varphi_2 - \alpha_w)^2 + 1} .\end{aligned}\quad (30)$$

Вираз (40) можна записати в залежності від  $\varphi_1$  з врахуванням (10) у вигляді:

$$\rho_2 = r_{b2} \sqrt{(\operatorname{tg} \alpha_w + (\alpha_w - \varphi_1)/i)^2 + 1}. \quad (31)$$

Таким чином, були отримані залежності для визначення радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$  (30) та кутів їх повороту  $\chi_1$  і  $\chi_2$  (3) та (5).

Побудуємо графіки отриманих виразів для зубчатих зачеплень з числом зубів  $z_1 = z_2 = 8$ ,  $z_1 = 9$   $z_2 = 7$  и  $z_1 = 7$   $z_2 = 9$ . Основні параметри цих зубчатих зачеплень, необхідних для побудови вказаних графіків, наведені в табл. 1.

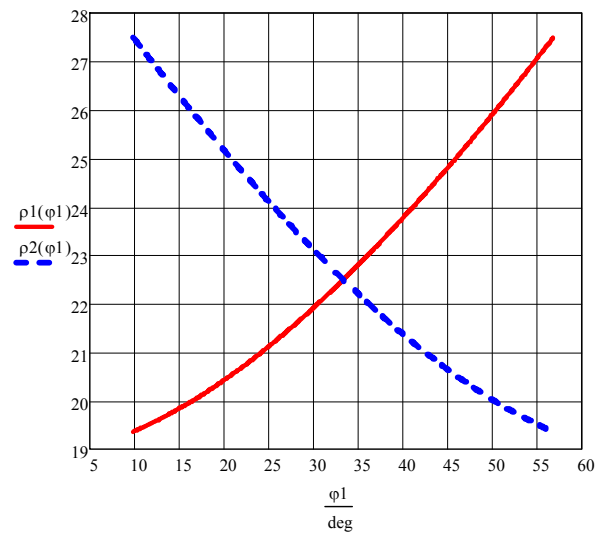
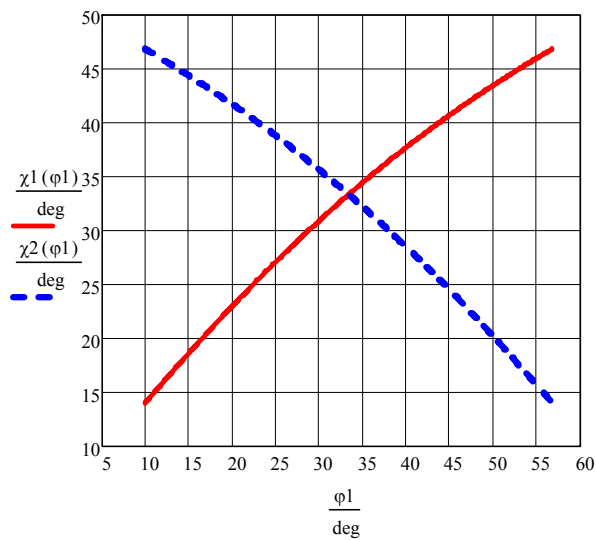


Рисунок 5 - Графіки залежностей кутів повороту  $\chi_1(\varphi)$  радіуса  $\rho_1$  і  $\chi_2(\varphi)$  радіуса  $\rho_2$  від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = z_2 = 8$ .

Рисунок 6 - Графіки залежностей довжин радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$  від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = z_2 = 8$ .

Джерело: розроблено авторами

Джерело: розроблено авторами

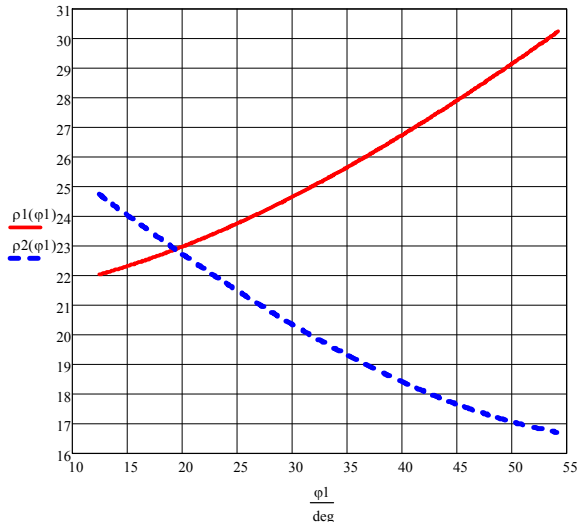
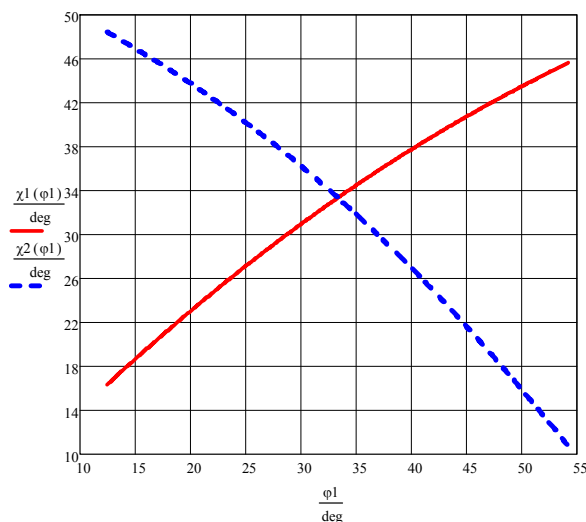


Рисунок 7 - Графіки залежностей кутів повороту  $\chi_1(\varphi)$  радіуса  $\rho_1$  і  $\chi_2(\varphi)$  радіуса  $\rho_2$  від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = 9$   $z_2 = 7$

Джерело: розроблено авторами

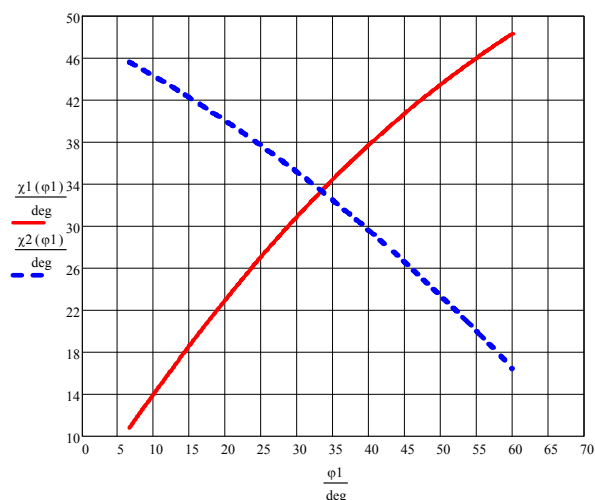


Рисунок 8 - Графіки залежностей довжин радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$  від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = 9$   $z_2 = 7$

Джерело: розроблено авторами

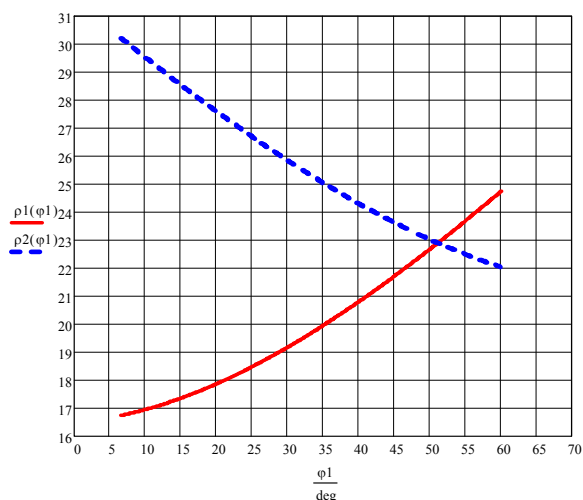


Рисунок 9 - Графіки залежностей кутів повороту  $\chi_1(\varphi)$  радіуса  $\rho_1$  і  $\chi_2(\varphi)$  радіуса повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = 7$   $z_2 = 9$

Джерело: розроблено авторами

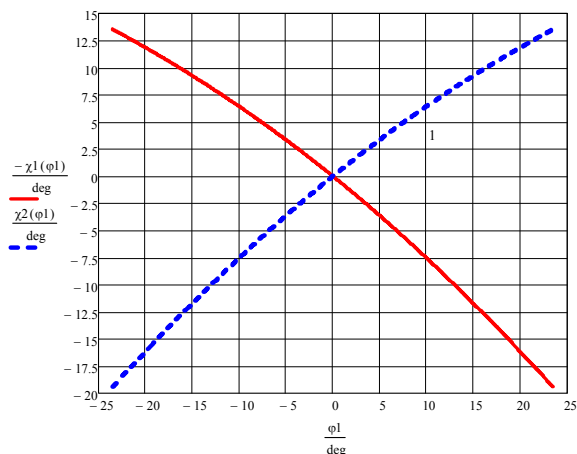


Рисунок 10 - Графіки залежностей довжин радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$  від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = 7$   $z_2 = 9$

Джерело: розроблено авторами

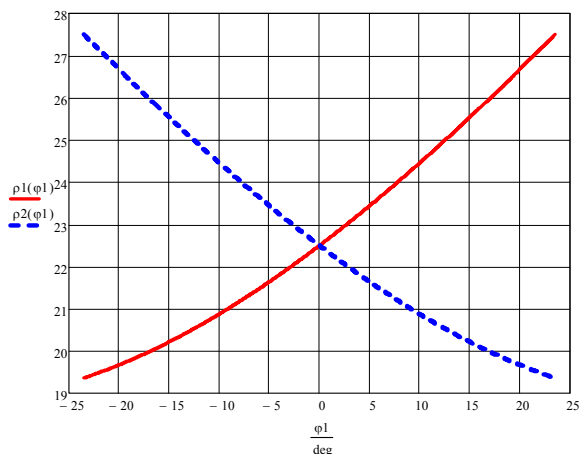


Рисунок 11 - Графіки залежностей кутів повороту радіуса  $\rho_1$  та  $\chi_2(\varphi)$  радіуса  $\rho_2$  від кута повороту вдучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = z_2 = 8$  в системі відліку від вісі  $O_1O_2$ .

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 12 - Графіки залежностей довжин радіусів  $\rho_1$  та  $\rho_2$  від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  зубчатого зачеплення з числом зубів  $z_1 = z_2 = 8$  в системі відліку від вісі  $O_1O_2$ .

Джерело: розроблено авторами

**Висновки:** 1. Аналіз джерел науково-технічної інформації показав, що в існуючих моделях робочого процесу шестеренних гідромашин не враховано

особливість евольвентного зубчатого зачеплення, яка полягає в тому, що евольвентні профілі зубів в своєму русі взаємно проковзують один по одному.

2. Для вивчення цієї особливості була поставлена та вирішена задача визначення залежностей кутів повороту  $\chi_1$  і  $\chi_2$  та радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$ , що з'єднують осі обертання шестерень з точкою зачеплення  $T$  від кута повороту ведучої шестерні або координати положення точки зачеплення зубів  $T$  на лінії зачеплення. При цьому враховано проковзування евольвентних профілів зубів шестерень.

3. Знайдено залежності довжин радіусів  $\rho_1$  і  $\rho_2$ , що з'єднують осі обертання шестерень з точкою зачеплення  $T$ , від кута повороту ведучої шестерні  $\varphi_1$  або координати положення точки зачеплення зубів  $T$  лінії зачеплення.

4. Отримані вирази дозволять вдосконалити існуючі математичні моделі руху робочої рідини в шестеренних гідромашинах, що дасть змогу дослідити низку процесів у гідромашинах, а саме:

- характер подачі з врахуванням нових особливостей в роботі шестеренних гідромашин;
- особливості зміни відсіченої порожнини та гідродинамічних процесів, що відбуваються в ній;
- пульсацію тиску та подачі робочої рідини;
- характер зміни навантаження на підшипники насоса та мотора;
- характер зміни крутного моменту, що розвиває шестеренний гідромотор;
- характер зміни потужності, що розвиває шестеренний гідромотор.

## Список літератури

1. Угінчус А.А. Гідравліка і гідравлічні машини. / Угінчус А.А. - 3-е перероб і доп. Харків, 1970 – 399 с.
2. THE THEORETICAL FLOW RIPPLE OF AN EXTERNAL GEAR PUMP A Thesis presented to the Faculty of the Graduate School University of Missouri-Columbia In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science By SURESH BABU KASARAGADDA Dr. Noah D. Manring. Thesis Supervisor DECEMBER 2003.
3. Kinematic Displacement Optimization of External Helical Gear Pumps Kuo Jao Huang and Chih Chieh Chen. Department of Mechanical Engineering, Chung Hua University No. 707, Sec.2, Wu-Fu Rd., Hsinchu, Taiwan, 300 R.O.C.
4. A NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF EXTERNAL GEAR PUMPS. Paolo CASOLI, Andrea VACCA and Germano FRANZONI Dipartimento di Ingegneria Industriale Università degli Studi di Parma Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma, Italy.
5. P. Casoli, A. Vacca, G.L. Berta. A numerical model for the simulation of flow in hydraulic external gear machines [Tener]: Power Transmission and Motion Control. 2006.-P. 147-165.
6. Кулешков Ю.В. Шестеренні насоси з асиметричною лінією зачеплення шестерен / [Кулешков Ю.В., Черновол М.І., Бевз О.В., Тітов Ю.А.] //Теорія, конструкція та розрахунок: монографія . Кіровоград: КОД, 2009. 243 с.
7. Кулешков Ю.В. Дослідження поведінки математичної моделі питомого робочого об'єму шестеренного насоса типу НШ від параметрів зубчатого зачеплення. / Кулешков Ю.В., Черновол М.І., Руденко Т.В. Гуцул В.І., Осін Р.А. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація Випуск 23 Кіровоград 2010, С. 278 – 390.
8. Кіницький Я. Т. Практикум із теорії механізмів і машин / Я. Т. Кіницький. – Львів : Афіша, 2002. – 450 с.
9. W.E. Wilson. Performance Criteria for Positive Displacement Pumps and Flind Motors. “Trans ASME” vol 71. Febr, 1949.
10. M.L. Unna. Innere Verlust sn Zannradpumpen. “Hydraulik und Pneumatik”, Nr 4, 1957.

## References

1. Uginchus A.A.(1970) Gidravlika I gidravlichni mashinu./ Uginchus A.A - 3-e pererob I dop. Kharkiv, – 399 s. [in Ukrainian]
2. THE THEORETICAL FLOW RIPPLE OF AN EXTERNAL GEAR PUMP A Thesis presented to the Faculty of the Graduate School University of Missouri-Columbia In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science By SURESH BABU KASARAGADDA Dr. Noah D. Manning. Thesis Supervisor DECEMBER 2003.[in USA]
3. Kinematic Displacement Optimization of External Helical Gear Pumps Kuo Jao Huang and Chih Chieh Chen. Department of Mechanical Engineering, Chung Hua University No. 707, Sec.2, Wu-Fu Rd., Hsinchu, Taiwan, 300 R.O.C. [in Taiwan]
4. A NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF EXTERNAL GEAR PUMPS. Paolo CASOLI, Andrea VACCA and Germano FRANZONI Dipartimento di Ingegneria Industriale Università degli Studi di Parma Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma, [in Italy].
5. P. Casoli, A. Vacca, G.L. Berta.( 2008) A numerical model for the simulation 4. Chernovol M.I. Osnovni napryamy vdoskonalennya shesterennyh nasosiv silskogospodarskoy tehniky/ Kuleshkov Y.V., Chernovol M.I., // Visnyk agrarnoy nauky, serpen, № 8. P. 52 - 54. [in Italy].
6. Kuleshkov Y.V.( 2009) Shesterennye nasosy s asimmetrichnoy liniey zacepleniya shesteren/ [Kuleshkov Y.V. Chernovol M.I. Beviz O.V., Titov Y.A.] //Teoriya, konstrukciya I raschet.- Monografiya – Kirivograd: «KOD», – 243 p. [in Ukrainian]
7. Kuleshkov Y.V. (2010) Doslidzhennya povedinky matematichnoy modeli putomogo robochogo obemu shesterennogo nasosa typu NSh vid parametriv zubchatogo pacheplennya. / Kuleshkov Y.V., Chernovol M.I., Rudenko T. V., Gucul V.I., Osin R.A. //Zbirnik naukovuh prac Kirivgradskogo nacionalnogo tehnicnogo universytetu. Tehnika v silskogospodarskomu vyrobnyctvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatyzaciya. Vypusk 23 Kirovograd. P. 278 – 390. [in Ukrainian]
8. Kinickiy Ya. T. (2002) Praktikum z teorii mahanizmov I mashin/ Ya. T. Kinickiy. – Lviv : Afisha., – 450 p. [in Ukrainian]
9. W.E. Wilson.(1949) Performance Criteria for Positive Displacement Pumps and Flind Motors. “Trans ASME” vol 71. Febr. [in English]
10. M.L. Unna. (1957.) Innere Verlust sn Zannradpumpen. “Hydraulik und Pneumatik”, Nr 4, [in German]

**Yuriy Kuleshkov**, Prof., DSc, **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mikhail Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevheniy Shtompel**, post-graduate  
*Central Ukrainian National Technical University*

### The Features of Cog Engagement's Functioning of Gear Hydraulic Machines

The purpose of this paper is to establish the relationship between the angle of rotation of the driving gear of a gear hydraulic machine and the angles of rotation of the radii connecting the axes of rotation of the gears with the meshing point, as well as to take into account the slippage of involute profiles of gear teeth relative to each other in mathematical models of the movement of working fluid in gear hydraulic machines.

To study the peculiarities of slipping of involute profiles, the problem of determining the dependence of the angles of rotation of the radii connecting the axes of rotation of the gears with the meshing point on the angle of rotation of the driving gear or the coordinate of the position of the meshing point of the teeth T on the meshing line was set and successfully solved.

The dependences of the lengths of the radii connecting the axes of rotation of the gears with the meshing point on the angle of rotation of the drive gear or the coordinate of the position of the tooth meshing point on the meshing line were found.

The obtained expressions will improve the existing mathematical models of the working fluid motion, which will make it possible to study a number of processes occurring in gear hydraulic machines.

The analysis of scientific and technical information sources showed that existing models of the working process of gear hydraulic machines do not take into account the feature of involute gearing, which consists in the fact that involute tooth profiles in their movement mutually slip over each other.

To study this feature, the task of determining the dependence of the angles of rotation and radii connecting the axes of rotation of the gears with the meshing point T on the angle of rotation of the drive gear or the coordinate of the position of the meshing point of the teeth T on the meshing line was set and successfully solved. The slippage of the involute profiles of the gear teeth is taken into account.

**involute tooth profiles, sliding involute surfaces, gear pump**

*Одержано (Received) 11.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 21.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 621.82

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.133-143](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.133-143)

А.Є. Дячун, доц., канд. техн. наук, І.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, Р.З. Золотий, доц., канд. техн. наук, С.О. Коваль, асп., О.Б. Дериш, асп., А.О. Брикса, асп.

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

*e-mail: dyachun\_andriy@ukr.net*

## Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом

Розроблено та виготовлено дослідний зразок автоматизованого гвинтового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертотворим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування сипких матеріалів. Проведено експериментальні дослідження для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів гвинтового конвеєра-змішувача, зокрема частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха, кута нахилу шнекового змішувача, із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки. Проведено статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодіваних та натуральних величинах залежності коефіцієнта неоднорідності змішування гвинтовим конвеєром від його конструктивних та технологічних незалежних змінних параметрів а також перевірку адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

**змішування, гвинтовий конвеєр, автоматизована установка, коефіцієнт неоднорідності змішування, сипкий матеріал, зерна, рівняння регресії**

**Постановка проблеми.** Висока надійність, екологічність, можливість роботи в поточних виробничих системах та порівняно низька вартість прямоочних гвинтових конвеєрів-змішувачів є причиною широкого їх використання в агровиробництві, харчовій, хімічній, фармацевтичній промисловості та інших галузях виробництва для виготовлення сумішей. Перевагою гвинтових змішувачів неперервної дії є те, що процес проходить неперервно, що забезпечує високу продуктивність змішування компонентів суміші та його просту автоматизацію. Проте інтенсивність перемішування у таких змішувачів, порівняно із періодичними, невисока і досягнення високих показників однорідності суміші досягається збільшенням часу перебування суміші у робочій зоні, що, як правило, призводить до збільшення довжини змішувачів, їх матеріало- та енергоємності. Зменшення вказаних показників забезпечується вибором раціональних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів-змішувачів, при яких реалізується зрив гвинтового потоку суміші та інтенсифікується її змішування.

Ефективність процесу змішування гвинтовими конвеєрами залежить від їх конструктивних особливостей, матеріалів робочих елементів, швидкості і часу змішування, властивостей компонентів, що піддаються змішуванню, таких як розміри частинок, вологість, коефіцієнти тертя. Дослідження впливу цих параметрів аналітичними методами є складними і не забезпечують достатньої точності, тому важливими є експериментальні дослідження із проектуванням і виготовленням установок гвинтових конвеєрів, зокрема із обертовими кожухами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Принцип роботи прямоточних гвинтових конвеєрів-змішувачів базується на особливостях транспортування сипкого вантажу гвинтовими конвеєрами, при якому проходить перемішування шарів при проходженні суміші робочим простором [1]. В працях [2, 3] показано, що таке перемішування найбільш інтенсивно відбувається у гвинтових конвеєрах при перехідних режимах, які характерні при переході від тихохідного до швидкохідного транспортування. Там же детально розглянута кінематика та динаміка гвинтових конвеєрів. Особливості роботи гвинтових конвеєрів-змішувачів наведено в [4]. Для виявлення особливості руху різних компонентів у гвинтових конвеєрах та аналізу їх кінематичних і динамічних показників, а також продуктивності, у [5] використано метод дискретних елементів (DEM). Візуалізація переміщень частинок в потоці вантажу гвинтових конвеєрів змішувачів із їх перемішуванням, наведена в [6]. Чисельне дослідження змішування частинок у шнековому змішувачі методом дискретних елементів наведено в [7]. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами проведений в [8]. Інтенсифікація процесів змішування виконанням профільованих шнеків та забезпечення належної якості суміші шляхом зміни робочого простору у телескопічних змішувачах розглянута в [9]. В [10] розроблено перспективну конструкцію гвинтового конвеєра-змішувача із введеними додатковими лопатями для кращого захвату суміші в обертовий рух та проведено її дослідження методом DEM. Дослідження п'яти різних конструкцій спеціальних гвинтових конвеєрів-змішувачів різної довжини з використанням DEM наведено в [11, 12]. Аналіз відомих результатів досліджень показав, що одним із найбільш перспективних напрямів підвищення якості змішування, підвищення продуктивності процесу, зменшення часу перебування компонентів в робочій зоні та зниження матеріалоємності обладнання є використання вдосконалених гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. Захват суміші обертовим кожухом гвинтового конвеєра-змішувача проходить аналогічно, як в барабанних млинах, особливості якого детально описано в [13]. У статті [14] подана конструкція експериментальної автоматизованої установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для уточнення параметрів моделі транспортування і змішування сумішей. Більшість із розглянутих конструкцій та способів змішування можуть забезпечити якісний розподіл компонентів по об'єму, проте не всі забезпечують їх належну згладжуючу здатність, тобто стабільність співвідношення компонентів в часі.

**Постановка завдання.** Метою завдання є проведення та представлення результатів експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом.

**Виклад основного матеріалу.** Для виконання поставлених завдань, перевірки адекватності теоретичних досліджень, здійснення практичної перевірки ефективності змішування з одночасним транспортуванням сільськогосподарських матеріалів запропонованими конструкціями гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом [14], одержаних внаслідок морфологічного аналізу та синтезу, проведено експериментальні дослідження у лабораторіях кафедри автомобілів ТНТУ.

В процесі виконання експериментальних та теоретичних досліджень вносились зміни з метою вдосконалення запропонованих гвинтових конвеєрів-змішувачів та вибору раціонального варіанту конструкції, встановлювались межі основних факторів, що впливають на якість змішування та характеризують особливості роботи і конструкції запропонованого гвинтового конвеєра-змішувача.

Програма експериментальних досліджень охоплювала такі етапи:

- розроблення та виготовлення дослідного зразка автоматизованого гвинтового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування матеріалів;

- проведення експериментальних досліджень для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів гвинтового конвеєра-змішувача, зокрема частоти обертання шнека  $n_1$ , частоти обертання кожуха  $n_2$ , кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача, із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки;

- збір та проведення статистичної обробки даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодованих та натуральних величинах залежності функціональних параметрів гвинтового конвеєра-змішувача від його конструктивних та технологічних незалежних змінних параметрів а також перевірка адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

Одним із етапів програми експериментальних досліджень є розроблення та виготовлення конструкції експериментальної автоматизованої установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для визначення і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів.

На основі попередньо виконаного літературно-патентного пошуку та модифікованого морфологічного аналізу здійснено синтез та одержано патенти України на корисні моделі на декілька конструкцій шнекових конвеєрів з обертовими кожухами, що забезпечують одночасне транспортування та змішування сипких матеріалів. Для дослідження запропонованих конструкцій шнекових конвеєрів спроектовано і виготовлено експериментальну установку [14].

Дослідний зразок експериментальної автоматизованої установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом із можливістю зміни кута нахилу змішувача, частоти та напрямку обертання шнека та кожуха, зміни конструкції шнеків зображено на рисунках 1, 3 та 4. Основними конструктивними елементами є рама 1, на якій розміщено бункер 2 із перегородками та шиберами, обертовий кожух 3 із розташованим в середині шнеком, електродвигуни 4 та 5 для приводу обертання кожуха та шнека, вивантажувальний патрубок 6, ємність 7 для збирання змішаних сипких матеріалів 8. До електродвигунів 4 та 5 за під'єднано два окремих перетворювачі 9 частоти струму (Altivar 71), що подається із мережі до електродвигунів. Керування та програмування роботою перетворювачів частоти струму, а відповідно і електродвигунами та конвеєром загалом здійснюється за допомогою двох ПК 10 з програмним забезпеченням PowerSuite, а також із застосуванням мікроконтролера із відповідним програмним забезпеченням. Детальніше установка описана у статті [14].

До проведення процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів та після його проведення здійснювали зважування цих матеріалів електронними вагами (рис. 2) з метою визначення рівня концентрації головного компонента в пробах одержаних сумішей та продуктивності транспортування.

Після зважування сипкі матеріали завантажувались у бункер гвинтового конвеєра-змішувача у відділення між перегородками (рис. 3) із закритими шиберами отворами для пересипання.

Після запуску двигунів відбувалось переміщення шиберів у бункері на регульовану величину із попаданням матеріалу на шнек конвеєра з наступним його переміщенням та змішуванням (рис. 4).



Рисунок 1 - Фото загального вигляду експериментальної установки

*Джерело: розроблено авторами*

Рисунок 2 - Зважування зернових матеріалів після змішування

*Джерело: розроблено авторами*

Рисунок 3 - Завантажені зерна кукурудзи 1, гречки 2 та проса 3 у бункер гвинтового конвеєра-змішувача у відділення між перегородками

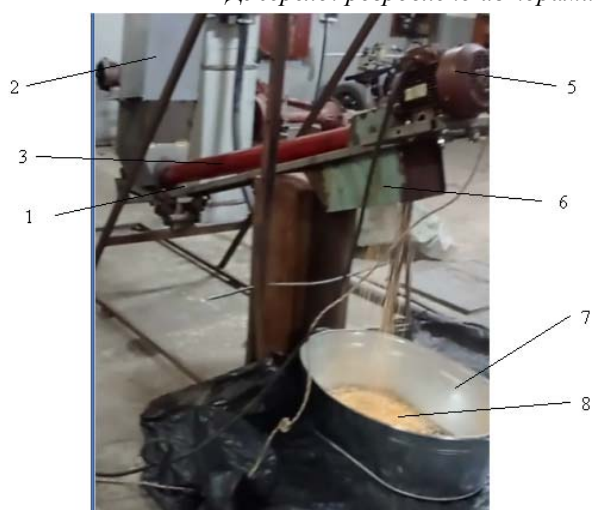
*Джерело: розроблено авторами*

Рисунок 4 - Фрагмент процесу транспортування та змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром-змішувачем

*Джерело: розроблено авторами*

На основі вибору змінних вхідних факторів, рівнів їх варіювання та розрахунків одержано таблицю 1 при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів.

Проведено три основні досліді: при змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса (ключовий компонент – зерна проса (20%), умовні компоненти – зерна кукурудзи (40%) та гречки (40%); при змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки (ключовий компонент – зерна гречка (20%), умовний компонент – зерна кукурудзи (80%); при змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху (ключовий компонент – зерна гороху (20%), умовний компонент – зерна пшениці (80%).

Таблиця 1 – Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів

| Фактори                                             | Позначення      |       | Інтерв. варіюв. | Рівні варіювання, натур.(кодовані) |         |          |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|------------------------------------|---------|----------|
|                                                     | натур.          | код.  |                 |                                    |         |          |
| Частота обертання шнека                             | $n_1$ , об/хв   | $x_1$ | 50              | 350 (+1)                           | 300 (0) | 250 (-1) |
| Частота обертання кожуха у напрямку обертання шнека | $n_2$ , об/хв   | $x_2$ | 50              | 200 (+1)                           | 150 (0) | 100 (-1) |
| Кут нахилу шнекового змішувача                      | $\alpha$ , град | $x_3$ | 15              | 30 (+1)                            | 15 (0)  | 0 (-1)   |

Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$K_{1(x_1, x_2, x_3)} = 9 + 0,551x_1 - 0,801x_2 - 0,626x_3 + 0,116x_1x_2 - 0,054x_1x_3 + 0,019x_2x_3 + 0,155x_1^2 - 0,055x_2^2 + 0,25x_3^2, \quad (1)$$

$$K_{1(n_1, n_2, \alpha)} = 15,88 - 0,032n_1 - 0,024n_2 - 0,057\alpha + 4,64 \cdot 10^{-5}n_1n_2 - 7,2 \cdot 10^{-5}n_1\alpha + 2,53 \cdot 10^{-5}n_2\alpha + 6,2 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 2,2 \cdot 10^{-5}n_2^2 + 1,11 \cdot 10^{-3}\alpha^2. \quad (2)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (2), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 5 та 6.

Аналізуючи рівняння регресії (1) встановлено, що основним фактором, який впливає на коефіцієнт неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом є фактор  $x_2(n_2)$ . Менший вплив має фактор  $x_3(\alpha)$  і найменший - фактор  $x_1(n_1)$ . Зростання другого і третього факторів призводить до зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування, а зростання першого – до збільшення коефіцієнта неоднорідності змішування.

З рисунків 5, 6 та рівняння регресії (2) зроблено висновки, що максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 11,28 %, а мінімальне – 7,32 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,1 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,22 рази, а зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,12 рази.

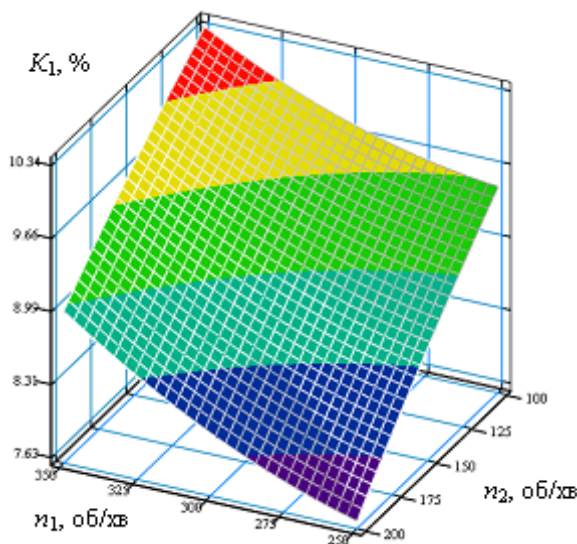


Рисунок 5 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та частоти обертання кожуха  $n_2$  ( $\alpha = 15$  град)  
Джерело: розроблено авторами

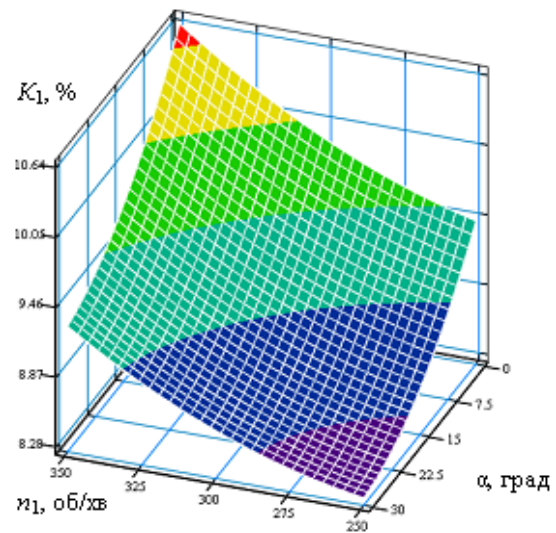


Рисунок 6 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача ( $n_2 = 150$  об/хв)  
Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$K_{2(x_1, x_2, x_3)} = 8,505 + 0,73x_1 - 0,69x_2 - 0,61x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,05x_1x_3 + 0,025x_2x_3 + 0,142x_1^2 - 0,058x_2^2 + 0,242x_3^2, \quad (3)$$

$$K_{2(n_1, n_2, \alpha)} = 14,58 - 0,0302n_1 - 0,0214n_2 - 0,0546\alpha + 4 \cdot 10^{-5}n_1n_2 - 6,67 \cdot 10^{-5}n_1\alpha + 3,33 \cdot 10^{-5}n_2\alpha + 5,68 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 2,32 \cdot 10^{-5}n_2^2 + 1,075 \cdot 10^{-3}\alpha^2. \quad (4)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4), в межах змінних входних факторів, за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 7 та 8.

З рисунків 7, 8 та рівняння регресії (4) зроблено висновки, що максимальне

значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 10,8 %, а мінімальне – 6,8 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,15 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,20 рази, а зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,14 рази.

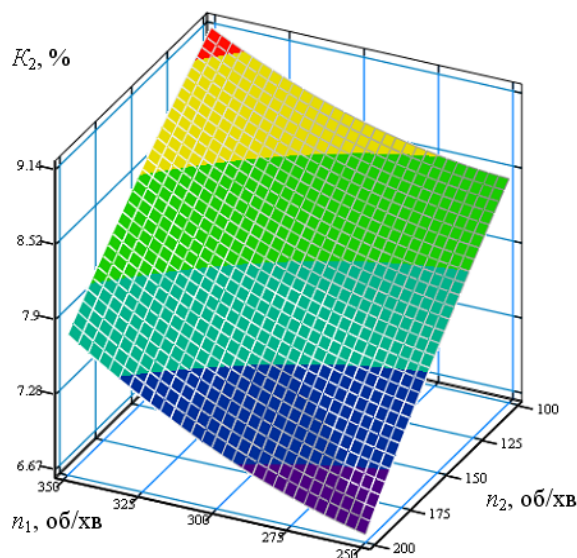


Рисунок 7 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та частоти обертання кожуха  $n_2$  ( $\alpha = 15$  град)  
Джерело: розроблено авторами

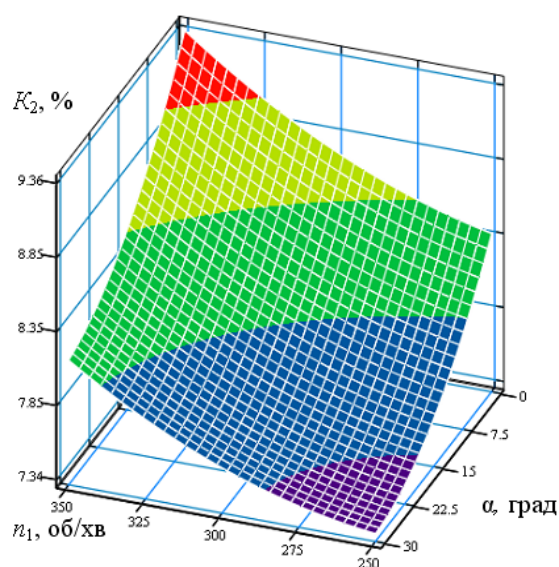


Рисунок 8 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача ( $n_2 = 150$  об/хв)  
Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$K_{3(x_1, x_2, x_3)} = 7,652 + 0,348x_1 - 0,66x_2 - 0,507x_3 + 0,09x_1x_2 - 0,043x_1x_3 + 0,015x_2x_3 + 0,118x_1^2 - 0,042x_2^2 + 0,203x_3^2, \quad (5)$$

$$K_{3(n_1, n_2, \alpha)} = 13,53 - 0,0259n_1 - 0,0193n_2 - 0,0467\alpha + 3,6 \cdot 10^{-5}n_1n_2 - 5,73 \cdot 10^{-5}n_1\alpha + 2 \cdot 10^{-5}n_2\alpha + 4,72 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 1,68 \cdot 10^{-5}n_2^2 + 9,02 \cdot 10^{-4}\alpha^2. \quad (6)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (6), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим конвєсором з обертовим кожухом, що представлено на рис. 9 та 10.

Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 9,41 %, а мінімальне – 6,4 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до

350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,07 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,21 рази, а зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,11 рази.

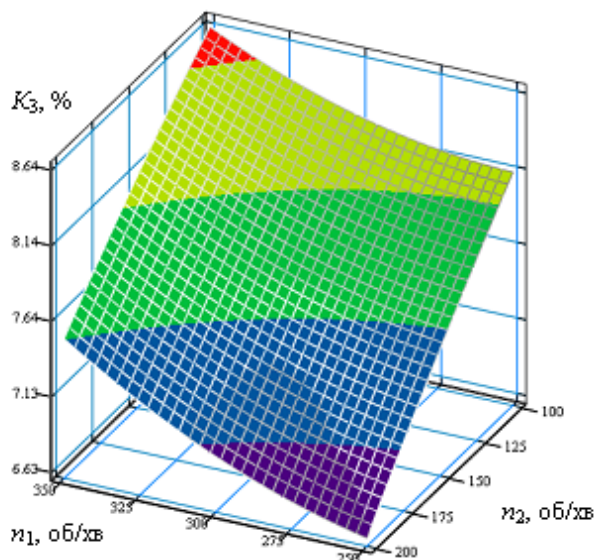


Рисунок 9 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та частоти обертання кожуха  $n_2$  ( $\alpha = 15$  град)  
Джерело: розроблено авторами

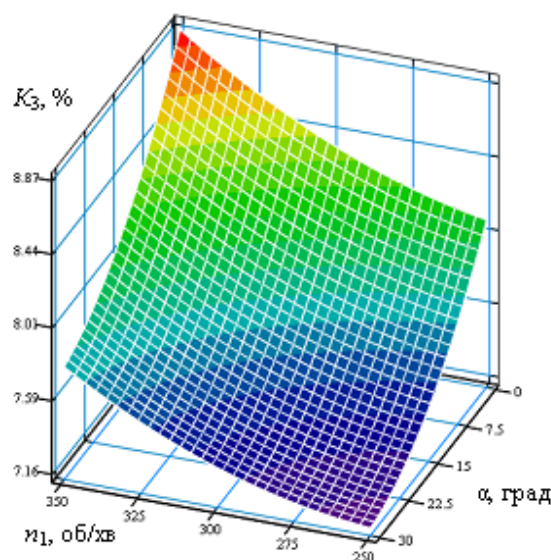


Рисунок 10 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача ( $n_2 = 150$  об/хв)  
Джерело: розроблено авторами

### Висновки:

1. Представлено результати експериментальних досліджень із використанням розробленого та виготовленого дослідного зразка автоматизованої установки гвинтового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування зернових матеріалів, під час яких визначали закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека  $n_1$ , частоти обертання кожуха  $n_2$ , кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки. у таких межах зміни вхідних факторів:  $250 \leq n_1 \leq 350$  (об/хв);  $100 \leq n_2 \leq 200$  (об/хв);  $0 \leq \alpha \leq 30$  (град).

2. Встановлено, що при зменшенні частоти обертання шнека та збільшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної та двохкомпонентних сумішей зменшується. Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 11,28 %, а мінімальне – 7,32 %. Для двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 10,8 %, а мінімальне – 6,8 %. Для двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 9,41 %, а

мінімальне – 6,4 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,14 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,15 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки, в 1,07 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,22 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,2 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки, в 1,21 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху. Зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,12 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,14 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки; в 1,11 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху.

3. Коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші шнековим змішувачем з обертовим кожухом є в 1,64 рази меншим ніж коефіцієнт неоднорідності змішування звичайним гвинтовим конвеєром із спіральним гвинтовим робочим органом в межах досліджуваних частот обертання шнеків від 250 об/хв до 350 об/хв.

## Список літератури

1. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Слободян Л.М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження. Тернопіль, 2019. 212 с.
2. Dheeraj M., Abhishek S., Harsh P., Ram D., Jyeshtharaj B., Shankar S. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Powder Technology*. 2020. Vol. 366. P. 369-381.
3. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L., Liubachivskyi R.O. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2015. Vol. 47. No. 3. P. 156-163.
4. Rohatynskiy R., Gevko I., Diachun A., Lyashuk O., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2019. 4/2019. P. 141-146.
5. Hu, G., Chen, J., Jian, B., Wan, H., Liu, L. Modeling and simulation of transportation system of screw conveyors by the discrete element method. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2010*. Article number 5536244. P. 927-930.
6. Aca Jovanović, Lato Pezo, Sanja Stanojlović, Nenad Kosanić, Ljubinko Lević. Discrete element modelling of screw conveyor-mixers. *Hem. Ind.* 2015. 69 (1). P. 95-101.
7. Liqing S. Xiaodi Z. Qingliang Z., Kuidong G., Kao J., Jiawei Z. Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. *Particuology*. 2022. Vol. 61. P. 91-102.
8. Гудь В.З. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Журнал «Інженерія природокористування»*. Харків, 2020. Вип. 1(15). С. 66-72.
9. Гудь В.З., Клендій В.М., Шуст І.М. Результати досліджень телескопічного гвинтового транспортера. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2019. Вип. 42. С. 12-20.
10. Fenglei Q., Theodore J. H., Mark Mba W. Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method. *Powder Technology*. 2017. Vol. 308. P. 334-345.
11. Milada P., Lato P., Aca J., Anja T., Ljubiša A., Biljana L., Predrag K. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors. *Powder Technology*. 2018. Vol. 336. P. 255-264.
12. Lato P., Aca J., Milada P., Radmilo Č., Biljana L. Modified screw conveyor-mixers – Discrete element modeling approach. *Advanced Powder Technology*. 2015. Vol. 26, Issue 5, P. 1391-1399.
13. Наumenko Ю.В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів: монографія. Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. 282 с.
14. Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. Експериментальна автоматизована установка гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для змішування сипких матеріалів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2024. Вип. 24. С. 38-44.

## References

1. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Liashuk O.L., Hud V.Z., Diachun A.Ie., Melnychuk A.L. & Slobodian L.M. (2019). Prospective screw conveyors: designs, calculations, research. Ternopil [in Ukrainian].
2. Dheeraj M., Abhishek S., Harsh P., Ram D., Jyeshtharaj B. & Shankar S. (2020). A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Powder Technology*, 366. P. 369-381.
3. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L. & Liubachivskyi R.O. (2015). The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH: Agricultural engineering*, Bucharest/Romania, 47, 3. P. 156-163.
4. Rohatynskyi R., Gevko I., Diachun A., Lyashuk O., Skyba O. & Melnychuk A. (2019). Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 4/2019. P. 141-146.
5. Hu, G., Chen, J., Jian, B., Wan, H. & Liu, L. (2010). Modeling and simulation of transportation system of screw conveyors by the discrete element method. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2010*, 5536244. P. 927-930.
6. Aca Jovanović, Lato Pezo, Sanja Stanojlović, Nenad Kosanić & Ljubinko Lević. (2015). Discrete element modelling of screw conveyor-mixers. *Hem. Ind*, 69 (1). P. 95–101.
7. Liqing S. Xiaodi Z. Qingliang Z., Kuidong G., Kao J. & Jiawei Z. (2022) Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. *Particuology*, 61. P. 91-102.
8. Gud V.Z. (2020). Synthesis of mixers with screw working bodies. *Journal "Environment Engineering"*, Harkiv, 1(15). P. 66-72 [in Ukrainian].
9. Hud V.Z., Klendii V.M. & Shust I.M. (2019). Research results of the telescopic screw conveyor. *Agricultural machines*, Lutsk, 42. P. 12-20 [in Ukrainian].
10. Fenglei Q., Theodore J. H. & Mark Mba W. (2017). Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method. *Powder Technology*, 308. P.334-345.
11. Milada P., Lato P., Aca J., Anja T., Ljubiša A., Biljana L. & Predrag K. (2018) Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors. *Powder Technology*, 336.P. 255-264.
12. Lato P., Aca J., Milada P., Radmilo Č. & Biljana L. (2015) Modified screw conveyor-mixers – Discrete element modeling approach. *Advanced Powder Technology*, 26, 5. P. 1391-1399.
13. Naumenko Yu.V. (2009) Fundamentals of the theory of operating modes of drum mills: monograph. Rivne [in Ukrainian].
14. Diachun A.Ie., Dmytriv O.R., Hevko B.R., Koval S.O. & Tsapyk R.P. (2024). Experimental automated installation of a screw conveyor with a rotating casing for mixing bulk materials. *Prospective technologies and devices*, Lutsk, 24. P. 38-44 [in Ukrainian].

**Andrii Diachun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Hevko**, Prof., DSc, **Roman Zolotyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Koval**, post-graduate, **Oleg Derysh**, post-graduate, **Andrii Bryksa**, post-graduate  
*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### The Results of Experimental Studies of the Quality of Bulk Materials Mixing by an Automated Installation of a Screw Conveyor with a Rotating Casing

The study of the effectiveness of mixing process by screw conveyor using analytical methods is difficult and does not provide sufficient accuracy, so experimental studies with the design and manufacture of screw conveyor installations, in particular with rotating casings, are important. The purpose of the work is to conduct and present the results of experimental research on the bulk materials mixing quality using an automated installation of a screw conveyor with a rotating casing.

A prototype of an automated screw conveyor with adjustable material supply in the area of loading from the hopper and with provided rotary movement of the casing in the direction of rotation of the screw for simultaneous mixing and transportation of bulk materials was developed and manufactured. The experimental studies were conducted to determine the relationship between the structural and technological parameters of the screw conveyor-mixer, in particular the rotation frequency of the screw, the rotation frequency of the casing, the angle of inclination of the screw mixer, with the coefficient of inhomogeneity of mixing a combination of different bulk materials: grains of corn, millet, peas, wheat, buckwheat. Statistical processing of data from the results of experimental studies was carried out to obtain regression equations in coded and natural values of the dependence of the coefficient of inhomogeneity of mixing by a screw conveyor on its constructive and technological independent variable parameters, as well as checking the adequacy of the obtained equations using application software.

It was established that with a decrease in the rotation frequency of the screw and an increase in the rotation frequency of the casing and the angle of inclination of the screw mixer, the value of the coefficient of inhomogeneity of the mixing of three-component and two-component mixtures decreases. The maximum value of the coefficient of inhomogeneity of the three-component mixture of corn, buckwheat and millet grains was 11.28%, and the minimum value was 7.32%. The coefficient of inhomogeneity of mixing of a two-component mixture by a screw mixer with a rotating casing is 1.64 times smaller than the coefficient of inhomogeneity of mixing by a conventional screw conveyor with a spiral screw working body within the studied screw rotation frequencies from 250 rpm to 350 rpm.

**mixing, screw conveyor, automated installation, coefficient of inhomogeneity of mixing, bulk material, grains, regression equation**

*Одержано (Received) 16.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 621.86

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.143-154](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.143-154)

**І.Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **А.Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук,

**Р.М. Рогатинський**, проф., д-р техн. наук, **Т.А. Довбуш**, доц., канд. техн. наук,

**В.М. Бучинський**, асп.

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

*e-mail: gevkoivan1@ukr.net*

## Синтез накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації

Проведено генерування ефективних конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу. В результаті проведеного синтезу отримано 57 варіантів конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми шести з них відображено на рисунках. Їх перевагами є здатність змінити об'єм накопичення, можливість збурення сипкого середовища і уникнення його заклинювання, забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів, здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра. На одержані конструкції подано заявки на отримання патентів України. Розроблено схему автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером, яка забезпечує постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів.

**структурно-схемний синтез, накопичення, завантаження, бункер, елемент, гвинтовий конвеєр, автоматизація**

**Постановка проблеми.** Накопичувально-завантажувальні системи, у тому числі бункери, мають широке застосування у сільському господарстві, будівельній, транспортній, фармацевтичній, харчовій і переробній та багатьох інших галузях економіки. Їх основним завданням є накопичення, зберігання і видача компонентів різноманітного структурного складу у необхідних кількостях із дотриманням санітарних, гігієнічних, техніко-економічних та інших вимог.

З метою створення різних типів накопичувально-завантажувальних бункерних системи з наступною їх оптимізацією для забезпечення відповідних вимог функціонування доцільно здійснити розроблення раціональних конструкцій при використанні методики структурно-схемного синтезу методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу. Використання даної методики проведення структурно-схемного синтезу дає змогу отримати обмежену кількість конструктивних рішень досліджуваних засобів з врахуванням градації вимог, які ставляться до них в процесі їх розробки, що дозволяє значно зекономити витрати часу та ресурсів на пошук ефективніших альтернатив.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробленням конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем та розрахунком їх параметрів займаються як окремі підприємства, так і наукові дослідники. Зокрема, у роботі [1] наведено систему вимірювання маси комбікорму в бункері дозатора із наявністю засобів для вимірювання, реєстрації та передачі інформації електричними сигналами, проте не додано можливості адаптації даної системи до зовнішніх впливів. Використання досвідного стенду для дослідження факторів, що впливають на характер протікання сипкого матеріалу у бункері та чисельної оцінки взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та продуктивністю розглянуто у роботі [2]. Значного розширення можливостей вивчення процесів протікання сипких матеріалів надало застосування методу дискретних елементів (МДЕ) [3-8]. У роботі [3] за допомогою цього методу розглянуто моделювання процесу руху сипких матеріалів у циліндрично-конічному бункері.

У роботі [4] проведено моделювання переміщення дископодібних пружних частинок у бункері із зміною кутів нахилу стінок бункера та розмірів вивантажувальних отворів. Встановлено взаємозв'язок швидкості висипання матеріалу, виникнення склепіння матеріалу із параметрами матеріалу. У роботі [5] за допомогою МДЕ досліджено вплив кутів розміщення стінок бункера на ефект заклинювання матеріалу в бункері. У роботі [6] проведено чисельні експерименти на основі МДЕ для визначення продуктивності висипання еліпсоподібних частинок із циліндричного бункера та порівняння їх із фізичними експериментами. У роботі [7] приведено опис кінематичних та мікро механічних властивостей потоку сипкого матеріалу біля випускного отвору бункера на основі двох та трьох мірного моделювання. Робота [8] присвячена дослідженням потоку сипкого матеріалу у бункері із двома симетрично розміщеними випускними отворами, використовуючи велосиметрію зображення частинок та МДЕ. У роботі [9] експериментально проаналізовано вплив розміру частинок сипкого матеріалу на швидкість потоку при розвантаженні квазі-двохмірного бункера. У вказаних роботах визначаються при певних параметрах проблеми із забезпеченням постійності потоку витікання сипкого матеріалу, які можливо вирішити за рахунок внесення змін у конструкції існуючих бункерів як складової частини конвеєрів. Для цього можливе використання методів структурного та параметричного синтезу, які використовуються при генеруванні і розробленні прогресивних машинобудівних конструкцій, у тому числі і складових частин конвеєрних систем [10-12]. Також слід зазначити, що зростаючі потреби багатьох галузей економіки у використанні накопичувально-завантажувальних бункерних систем, особливо у сільському господарстві, будівництві, харчовій та переробній промисловості, фармації, зумовлюють зростаючі потреби у розробленні і дослідженні модернізованих конструкцій бункерних систем із високими санітарними, гігієнічними, техніко-економічними, безпековими та іншими вимогами. Відтак їх розроблення є актуальним завданням.

**Постановка завдання.** Метою завдання є генерування ефективних конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу.

**Виклад основного матеріалу.** Потребу постійного вдосконалення накопичувально-завантажувальних бункерних систем здійснено за рахунок генерування їх конструктивних альтернатив на основі застосування структурно-схемного синтезу відомим методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу [11, 12].

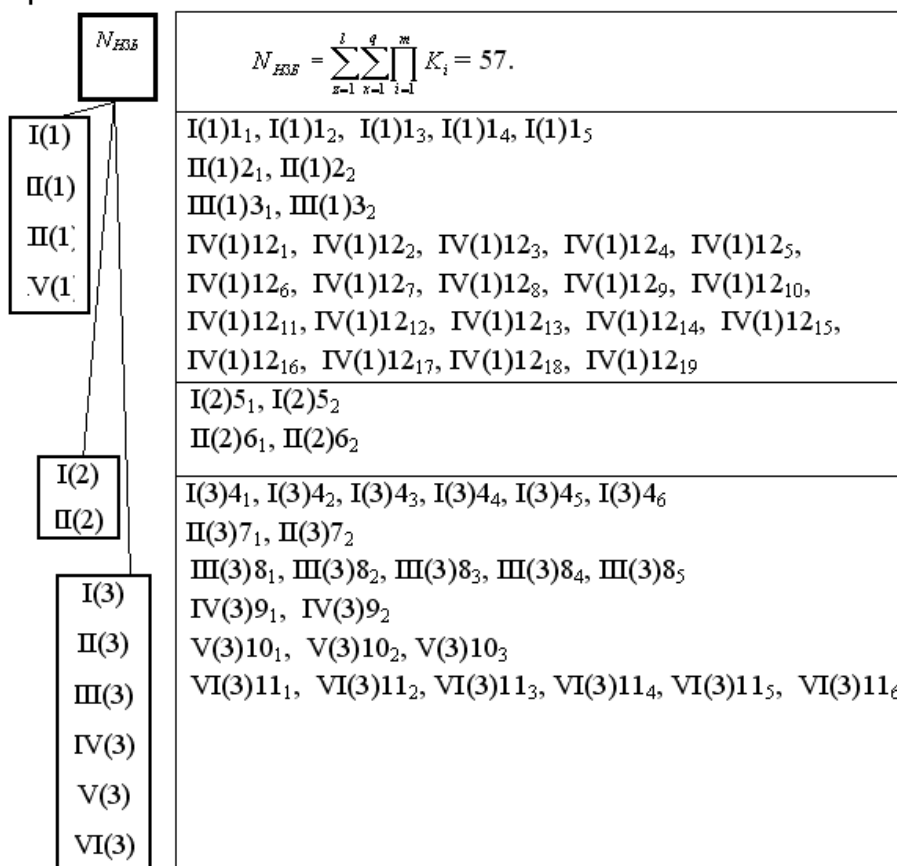
При здійсненні синтезу визначено конструктивні елементи бункера та їх ознаки, а також їх взаємозв'язки. Це забезпечило можливість побудови морфологічної таблиці цих конструктивних елементів та їх ознак (табл. 1), на основі чого створено модель механічної системи «Накопичувально-завантажувальний бункер» (рис. 1). При проведенні структурно-схемного синтезу бункерних систем вибрано такі базові конструктивні елементи та їх морфологічні ознаки: принцип вивантаження (входять п. 1 «активний» і п. 2 «пасивний»); п. 3 «механізм завантаження»; п. 4 «розташування відносно розвантажувального пристрою»; п. 5 «профіль»; п. 6 «об'єм»; п. 7 «ступінь рухомості»; п. 8 «матеріал покриття камери»; додаткові елементи (входять п. 9 «наявність», п. 10 «кількість», п. 11 «розташування» і п. 12 «профіль»).

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця елементів та конструктивних ознак накопичувально-завантажувальних бункерів

| Принцип вивантаження                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Активний                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                            | 2. Пасивний                                                                                                                                                 |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                 |
| 1.1. З пневматичною подачею;<br>1.2. Гравітаційний з вібраційним струшуванням;<br>1.3. Гравітаційний з ручною механічною подачею;<br>1.4. Гравітаційний з механічною подачею від електропривода;<br>1.5. Гравітаційний із збуренням сипкого середовища додатковим елементом від привода. |                                                                                                                                                                            | 2.1. Гравітаційний без розташування в середині бункера додаткових елементів;<br>2.2. Гравітаційний з розташуванням в середині бункера додаткових елементів. |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                 |
| 3. Механізм завантаження                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4. Розташування відносно розвантажувального пристрою                                                                                                                       | 5. Профіль                                                                                                                                                  | 6. Об'єм                                                                                            | 7. Ступінь рухомості                                                                                                                                                                                            |
| 3.1. З регульованим завантаженням;<br>3.2. З нерегульованим завантаженням.                                                                                                                                                                                                               | 4.1. Співвісне перпендикулярне;<br>4.2. Бічне перпендикулярне;<br>4.3. Співвісне нахилене;<br>4.4. Бічне нахилене;<br>4.5. Співвісне паралельне;<br>4.6. Бічне паралельне. | 5.1. Суцільний;<br>5.2. Секційний (для різних компонентів).                                                                                                 | 6.1. Постійний;<br>6.2. Змінний.                                                                    | 9.1. Один<br>9.2. Два                                                                                                                                                                                           |
| 8. Матеріал покриття камери                                                                                                                                                                                                                                                              | Додаткові елементи                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                             |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 9. Наявність                                                                                                                                                               | 10. Кількість                                                                                                                                               | 11. Розташування                                                                                    | 12. Профіль                                                                                                                                                                                                     |
| 8.1. Сталь;<br>8.2. Пластик;<br>8.3. Гума;<br>8.4. Антисептичний;<br>8.5. Комбінований.                                                                                                                                                                                                  | 9.1. Використовуються;<br>9.2. Не використовуються.                                                                                                                        | 10.1. Один;<br>10.2. Два;<br>10.3. Декілька.                                                                                                                | 11.1. Горизонтальне;<br>11.2. Вертикальне;<br>11.3. Нахилене;<br>11.4. Перехресне;<br>11.5. Змінне; | 12.1. Трубка;<br>12.2. П-подібна ланка;<br>12.3. Л-подібна ланка;<br>12.4. М-подібна ланка;<br>12.5. Н-подібна ланка;<br>12.6. Трос;<br>12.7. Пружина розтягу-стиску;<br>12.8. Однонаправлена суцільна спіраль; |

|  |  |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--|--|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | 11.6.<br>Тимчасове. | 12.9. Різнонаправлена суцільна спіраль;<br>12.10. Однонаправлена лопатева спіраль;<br>12.11. Різнонаправлена лопатева спіраль;<br>12.12. Однонаправлена комбінована спіраль;<br>12.13. Різнонаправлена комбінована спіраль;<br>12.14. Однонаправлена стрічкова спіраль;<br>12.15. Різнонаправлена стрічкова спіраль;<br>12.16. Випукла кінчна втулка з гвинтовими елементами на верхній поверхні;<br>12.17. Опукла кінчна втулка з гвинтовими елементами на верхній поверхні;<br>12.18. Комбінований елемент;<br>12.19. Розрихлювачі (штирі, кутники тощо). |
|--|--|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Джерело: розроблено авторами



I - VI – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Рисунок 1 - Модель механічної системи «Накопичувально-завантажувальний бункер»

Джерело: розроблено авторами

Кількість альтернатив визначено за формулою [11, 12]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

де  $z$  – ієрархічний рівень;

$l$  – кількість ієрархічних рівнів;

$x$  – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня;

$q$  – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня;

$K_i$  – альтернатива конструктивної ознаки елемента певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня;

$m$  – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

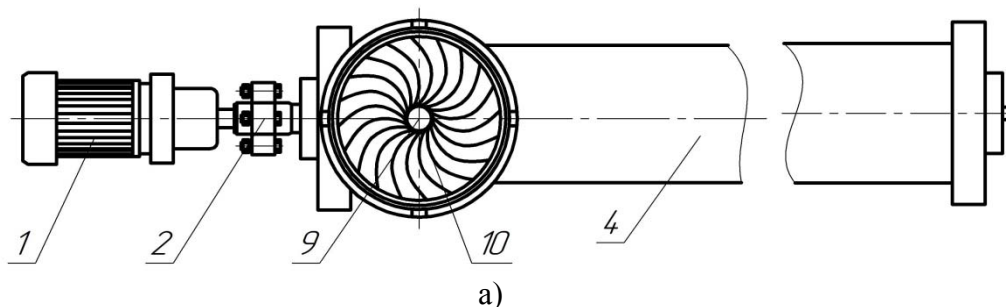
Загальна кількість генерованих варіантів накопичувально-завантажувальних бункерів при використанні методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу становитиме 57.

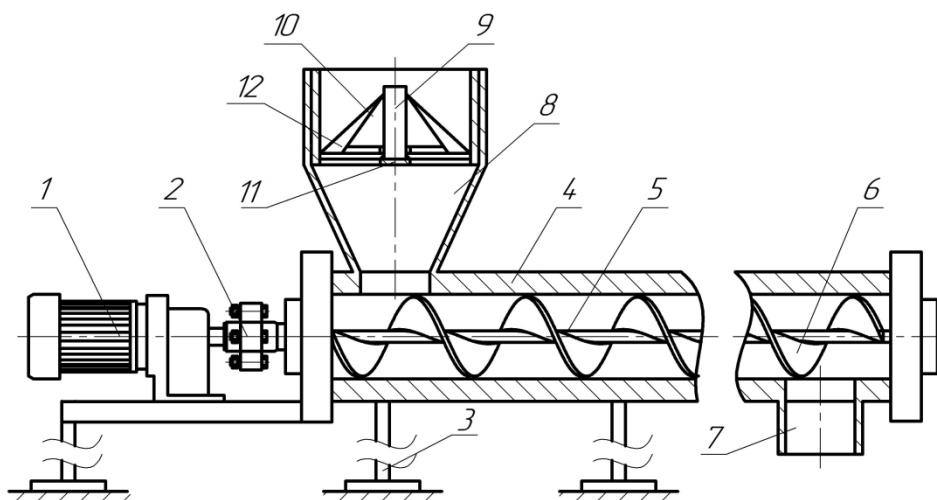
Найважливішим конструктивними ознаками та елементами в конструкціях накопичувально-завантажувальних бункерів за загальноприйнятими вимогами є принцип вивантаження, механізм регулювання вивантаження та профіль додаткових елементів (конструктивні ознаки 1 – 3 і 12 з табл. 1), а тому ми їх віднесли до першого ієрархічного рівня. Профіль, який може бути суцільний (для однокомпонентних чи готових змішаних продуктів) і секційний (для різних компонентів), а також об'єм бункера, що може бути постійний чи змінний (наприклад в розсувних бункерах), було віднесено до другого ієрархічного рівня.

Усі інші елементи та конструктивні ознаки накопичувально-завантажувальних бункерів, які приведені в табл. 1, були віднесені до третьої групи ієрархічного рівня, як ті, що мають найменше значення для них за загальноприйнятими вимогами.

Результатом проведеного синтезу є отримання значної кількості конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми яких відображено на рис. 2 – рис. 6. Їх перевагами є здатність зміни об'єму накопичення, можливість збурення (розрихлення) середовища і уникнення «куполоутворень» (злежаності), забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів.

Проведемо детальніший аналіз синтезованих конструкцій бункерів. На рис. 2 зображено гвинтовий змішувач з бункером рівномірного завантаження, у якому при розробленні бункера використано елементи та конструктивні ознаки 2.2, 3.2, 4.1, 5.1, 9.1, 10.1, 11.2, 12.16 з табл. 1. До переваг бункера належить здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра.





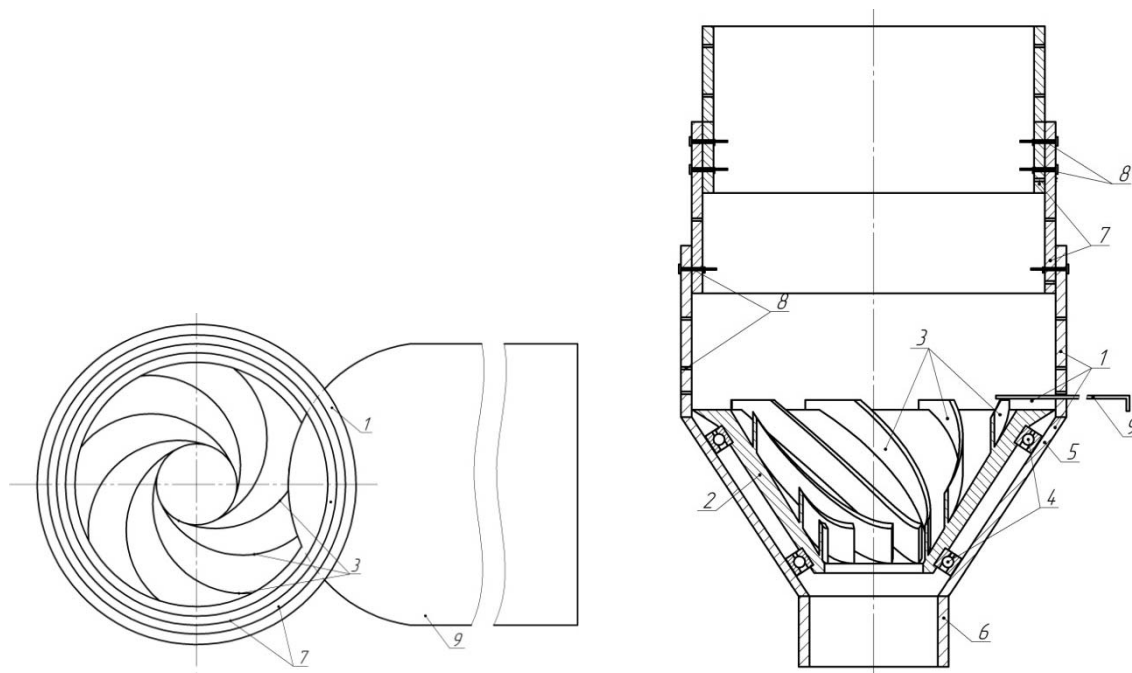
б)

1 - привід; 2 - муфта; 3 - опори; 4 - транспортна труба; 5 - вал; 6 - гвинтовий робочий орган;  
7 - розвантажувальний патрубок; 8 - бункер; 9 - вісь; 10 - випукла конічна втулка; 11 - кронштейн;  
12 - спіральні виступи

Рисунок 2 - Конструктивні схеми синтезованого бункера рівномірного завантаження:  
а) вид зверху; б) вид збоку

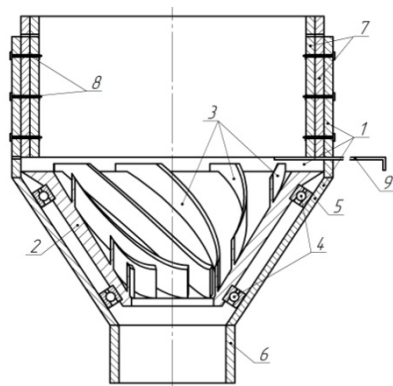
Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 представлено бункер рівномірного регульованого розпушування і завантаження сипких матеріалів зі змінним об'ємом (телескопічний), у якому використано елементи та конструктивні ознаки 2.2, 3.1, 4.1, 5.1, 6.2, 9.1, 10.1, 11.2, 12.17 з табл. 1. До його переваг належить здатність зміни об'єму накопичення, можливість розпушування сипких матеріалів та забезпечення рівномірного та регульованого завантаження.



а)

в)



б)

1 - бункер; 2 - опукла конічна втулка; 3 - спіральні виступи; 4 - підшипники; 5 - внутрішня конічна частина бункера; 6 - вивантажувальний патрубок; 7 - розсувний завантажувальний накопичувач; 8 - фіксатори; 9 - шибер

Рисунок 3 - Конструктивні схеми синтезованого бункера рівномірного регульованого розпушування і завантаження сипких матеріалів зі змінним об'ємом:  
а) вид зверху; б) у складеному вигляді; в) у розкладеному вигляді

*Джерело: розроблено авторами*

На рис. 4 зображено бункер рівномірного завантаження, у якому використано елементи та конструктивні ознаки 2.2, 3.2, 4.1, 5.1, 9.1, 10.1, 11.1, 12.8 з табл. 1. До його переваг належить здатність до розпушування сипких матеріалів.

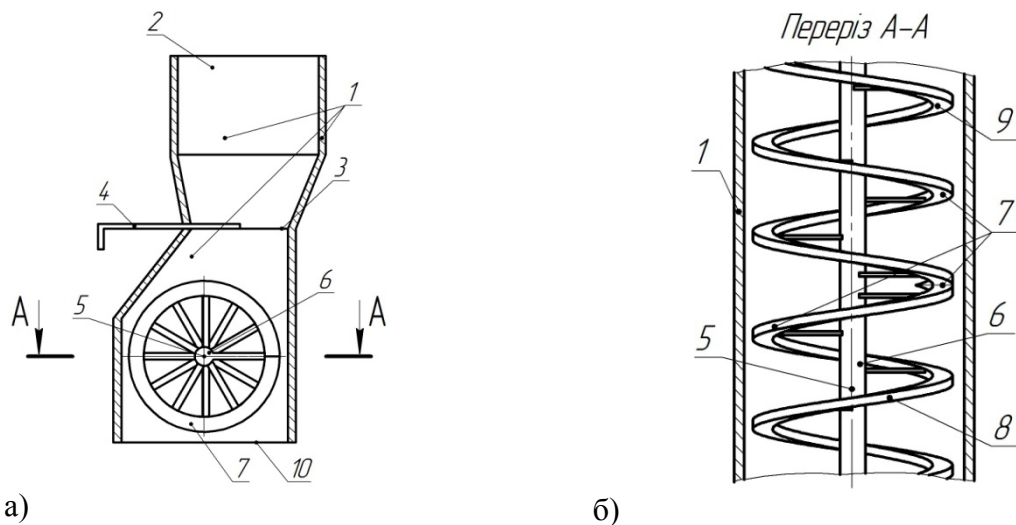
На рис. 5 і рис. 6 зображені бункери з додатковими елементами, зокрема П-подібною ланкою (рис. 5.а), тросом (рис. 5.б) і пружинами розтягу-стиску (рис. 6), які забезпечують збурення (розрихлення) середовища у бункері і уникнення його «куполоутворень» (злежаності).

Перевагою гвинтових конвеєрів із накопичувально-завантажувальними бункерами є те, що процес транспортування сипких матеріалів забезпечує високу продуктивність із простою автоматизацією, при цьому значна їх кількість може бути інтегрованою в автоматизовані системи управління, які забезпечують оптимізацію та підвищують ефективність виробничих процесів.

У розробленій схемі автоматизованої адаптивної системи граничного керування (рис. 7) гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером забезпечується постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів (зміни вологості матеріалу, зміни подачі матеріалу із бункера, зношення шнека та інших).

Розроблена система адаптивного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером за граничним критерієм працює таким чином: при зміні зовнішніх факторів (вологості та типу матеріалу, творення купола у

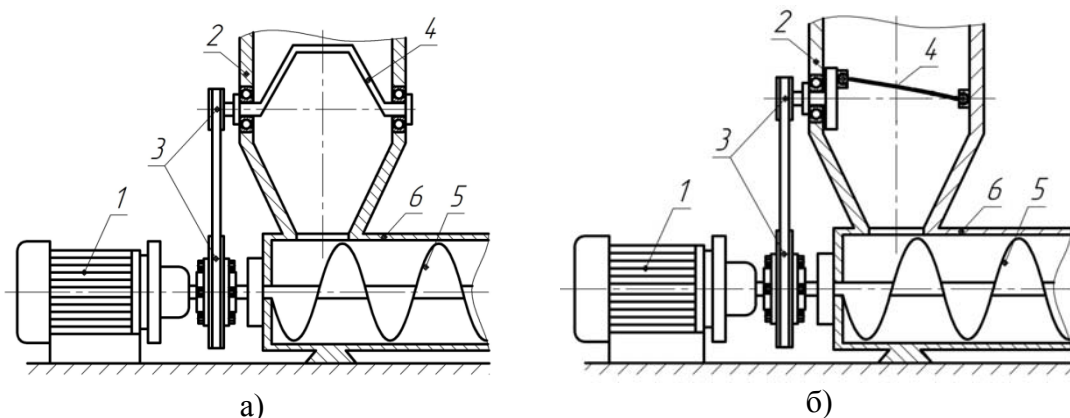
бункері, зношення шнека, заклинювання матеріалу у зазорі між шнеком та кожухом) система керування стабілізує задане граничне значення виробничих параметрів: продуктивності транспортування, потужності приводу шнека, вібрацій конвеєра, одержуючи від датчиків сигнали, що відповідають дійсному значенню цих параметрів.



1 - бункер; 2 - завантажувальний накопичувач; 3 - випускний отвір; 4 - шибер; 5 – вісь; 6 - втулка; 7 – спіральні виступи; 8 – лівосторонні спіральні виступ; 9 - правосторонні спіральні виступи

Рисунок 4 - Конструктивні схеми синтезованого бункера для змішування і розпушування сипких матеріалів: а) вид збоку; б) вид по А-А з виду збоку

Джерело: розроблено авторами



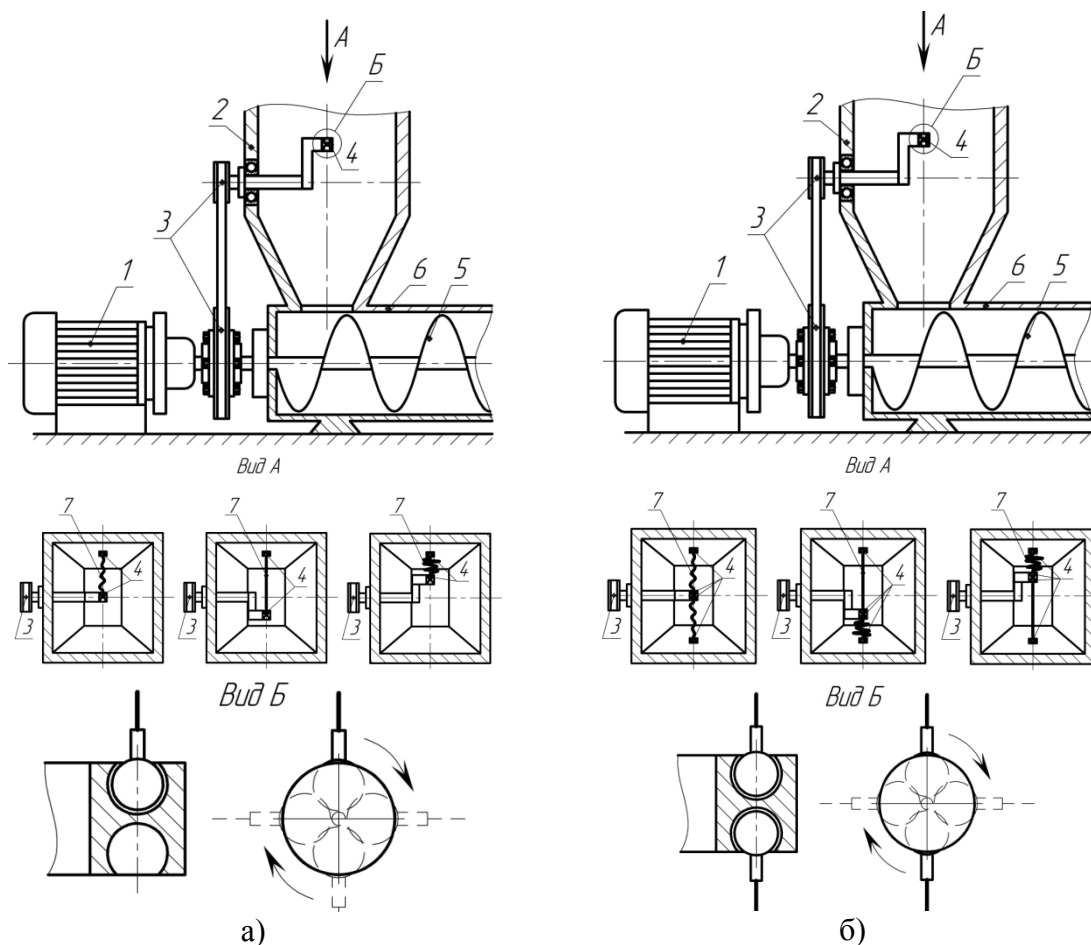
1 - привід; 2 - бункер; 3 - пасова передача; 4 - П-подібна ланка (а) і трос (б); 5 - гвинтовий робочий орган; 6 - транспортна труба

Рисунок 5 - Конструктивні схеми синтезованих бункерів з додатковими елементами: а) з П-подібною ланкою; б) з тросом

Джерело: розроблено авторами

Стабілізація заданих значень виробничих параметрів виконується відповідним збільшенням або зменшенням частоти обертання шнека  $n$  (на величину  $\Delta n$ ), величини вивантажувального отвору бункера  $L$  переміщенням шибера (на величину  $\Delta L$ ), частоти обертання розпушувача  $n_1$  (на величину  $\Delta n_1$ ), в результаті цього одержуються скоректовані значення виробничих параметрів.

У розробленій узагальненій схемі (рис. 8), що відповідає схемі автоматизованої адаптивної системи граничного керування (рис. 7) автоматизовані бункери та конвеєри обладнані системами регулювання, що дозволяють змінювати продуктивність процесу транспортування матеріалів із заданою точністю.



1 - привід; 2 - бункер; 3 - пасова передача; 4 - кріпильні шарніри; 5 - гвинтовий робочий орган; 6 - транспортна труба; 7 - пружини розтягу-стиску

Рисунок 6 - Конструктивні схеми синтезованих бункерів з пружинами розтягу-стиску:

а) односторонньої дії; б) двосторонньої дії

Джерело: розроблено авторами

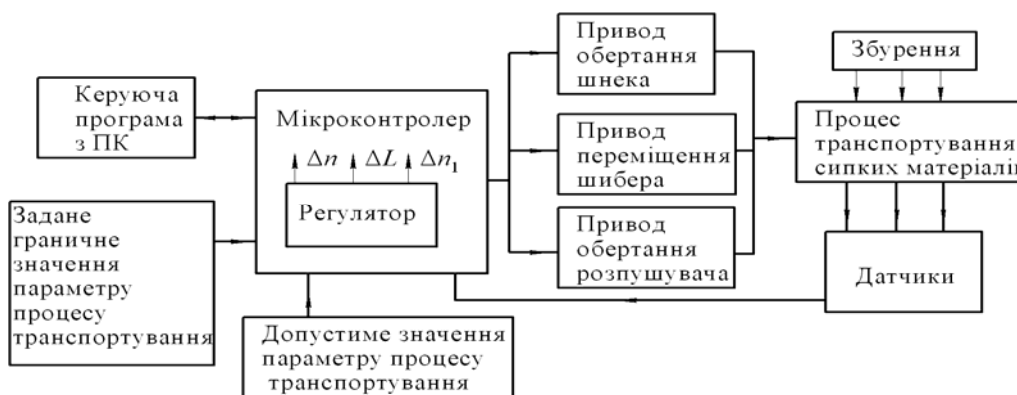


Рисунок 7 - Схема автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером

Джерело: розроблено авторами

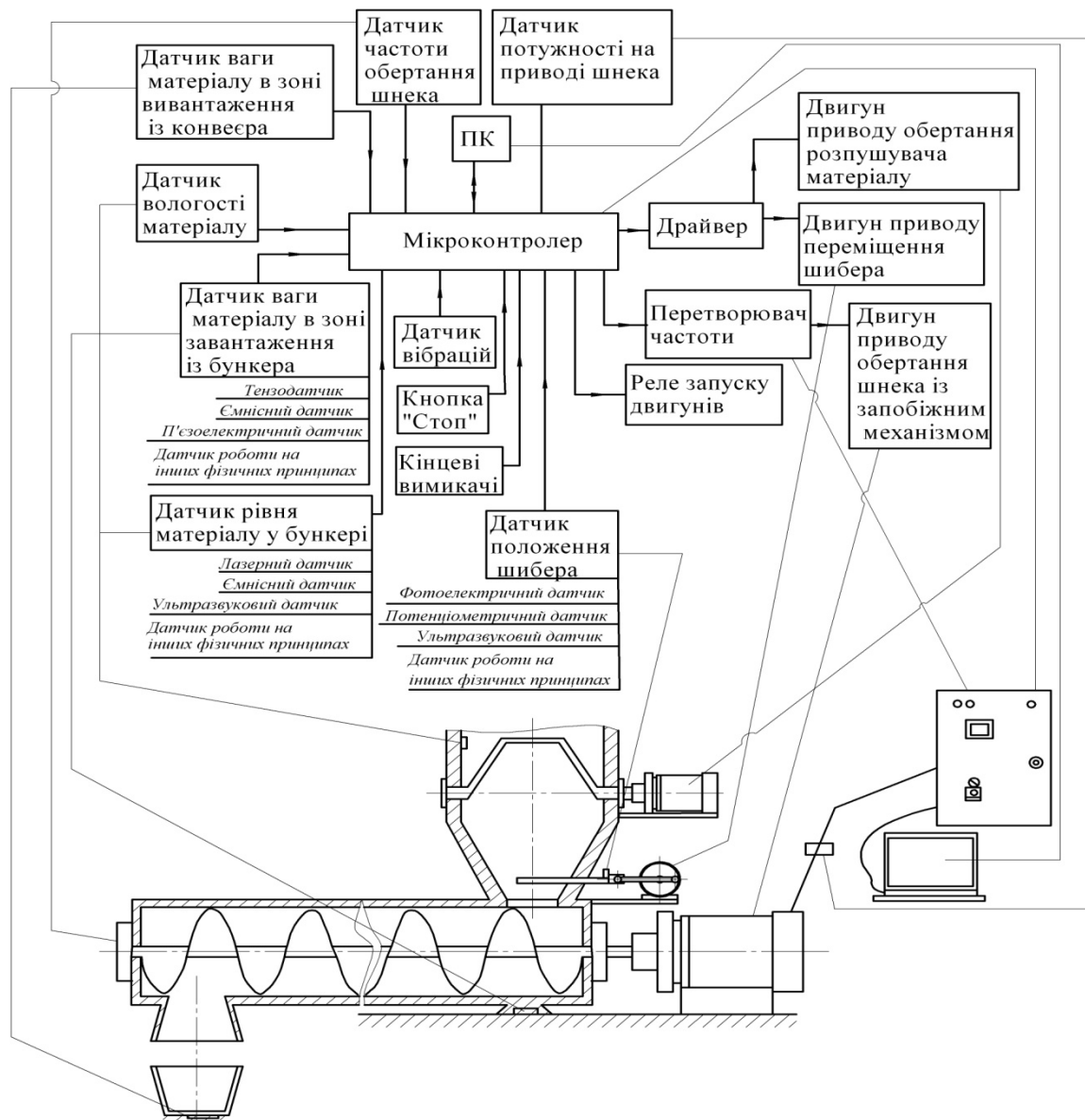


Рисунок 8 - Узагальнена схема автоматизованого бункера та конвеєра, що обладнані системами регулювання

Джерело: розроблено авторами

Управління такими системами здійснюється з персонального комп'ютера за допомогою мікроконтролера. Мікроконтролер виконує оброблення сигналів із різноманітних датчиків (рис. 8), кількість і необхідність яких визначається особливостями і завданнями виробничих процесів, зокрема датчиків ваги матеріалу, що переміщується, датчика рівня матеріалу у бункері, датчика вологості матеріалу, датчика положення шибера, датчика вібрацій, датчика частоти обертання шнека, датчика крутного моменту на шнекові або потужності його приводу. Також мікроконтролер здійснює керування електроприводами обертання шнека, переміщення шибера, обертання розпушувача.

Змінюючи кількість та склад елементів даної системи, можна генерувати різноманітні конструктивні схеми накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації.

**Висновки:** 1. Проведено генерування ефективних конструкцій накопичувально-

завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу. В результаті проведеного синтезу отримано 57 варіантів конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми шести з них відображено на рисунках. Їх перевагами є здатність зміни об'єму накопичення, можливість збурення сипкого середовища і уникнення його заклинювання, забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів, здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра. На одержані конструкції подано заявки на отримання патентів України.

2. Розроблено схему автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером, яка забезпечує постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів. У розробленій узагальненій схемі автоматизовані бункери та конвеєри обладнані системами регулювання, що дозволяють змінювати продуктивність процесу транспортування матеріалів із заданою точністю. Змінюючи кількість та склад елементів даної системи, можна генерувати різноманітні конструктивні схеми накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації.

## Список літератури

1. Банга В.І., Крупич О.М. Методика експериментальних досліджень вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2019. Вип. №14. С. 31-37.
2. Ничеглод В.В., Бурмістенков О.П., Стаценко В.В. Дослідження впливу форми бункера на характер протікання порошкових сипких матеріалів. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 6 (11). С. 42-51.
3. Стаценко В.В., Бурмістенков О.П., Біла Т.Я. Дослідження характеру плинусипких матеріалів в бункерних пристроях методом дискретних елементів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. №6 (267). Т. 1. С. 7-14.
4. Kondic L. Simulations of two dimensional hopper flow. *Granular Matter*. 2014. 16. P. 235–242.
5. López-Rodríguez D., Gella D., To K., Maza D., Garcimartín A., Zuriguel I. Effect of hopper angle on granular clogging. *Physical review*. 2019. E 99. 032901.
6. Liu S.D., Zhou Z.Y., Zou R.P., Pinson D., Yu A.B. Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. *Powder Technology*. 2014. 253. P. 70–79.
7. Rubio-Largo S.M., Janda A., Maza D., Zuriguel I., Hidalgo R.C. Disentangling the free-fall arch paradox in silo discharge. *Physical review letters*. 2015. 114. 238002.
8. Fullard L.A., Breard E.C.P., Davies C.E., Godfrey A.J.R., Fukuoka M., Wade A., Dufek J., Lube G. The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings. *Proc. R. Soc.* 2019. A 475. 20180462.
9. Gella D., Maza D., Zuriguel I. Role of particle size in the kinematic properties of silo flow. *Physical review*. 2017. E 95. 052904.
10. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Вар'ян А.Р., Кондратюк О.М. Стендове обладнання для дослідження модернізованих гвинтових конвеєрів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне, 2016. Вип. 3 (75). С. 274-282.
11. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р. Синтез гвинтових транспортно-технологічних механізмів з транспортуючими кожухами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2016. Вип. 168. С. 149-155.
12. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р., Мельничук А.Л., Шуст І.М. Генерування конструкцій гвинтових механізмів методом морфологічного аналізу з ієрархічним групуванням. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10. С. 186-192.

## References

1. Banha V.I. & Krupych O.M. (2019). Methodology of experimental studies of the feed mass meter in the dispenser hopper. *Prospective technologies and devices*, Lutsk, 14, 31-37 [in Ukrainian].

2. Nychehlo V.V., Burmistenkov O.P. & Statsenko V.V. (2022). Study of the influence of the shape of the hopper on the nature of the flow of powdery loose materials. *Technologies and engineering*, 6 (11), 42-51 [in Ukrainian].
3. Statsenko V.V., Burmistenkov O.P. & Bila T.Ia. (2018). Study of the nature of the flow of loose materials in hopper devices by the discrete elements method. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 6 (267), 1, 7-14 [in Ukrainian].
4. Kondic L. (2014). Simulations of two dimensional hopper flow. *Granular Matter*, 16, 235–242.
5. López-Rodríguez D., Gella D., To K., Maza D., Garcimartín A. & Zuriguel I. (2019). Effect of hopper angle on granular clogging. *Physical review*, E 99, 032901.
6. Liu S.D., Zhou Z.Y., Zou R.P., Pinson D. & Yu A.B. (2014). Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. *Powder Technology*, 253, P. 70–79.
7. Rubio-Largo S.M., Janda A., Maza D., Zuriguel I. & Hidalgo R.C. (2015). Disentangling the free-fall arch paradox in silo discharge. *Physical review letters*, 114, 238002.
8. Fullard L.A., Breard E.C.P., Davies C.E., Godfrey A.J.R., Fukuoka M., Wade A., Dufek J. & Lube G. (2019). The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings. *Proc. R. Soc. A* 475, 20180462.
9. Gella D., Maza D. & Zuriguel I. (2017). Role of particle size in the kinematic properties of silo flow. *Physical review*, E 95, 052904.
10. Hevko I.B., Diachun A.Ie., Melnychuk A.L., Varian A.R. & Kondratiuk O.M. (2016). Bench equipment for the study of modernized screw conveyors. *Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management*, Rivne, 3 (75), 274-282 [in Ukrainian].
11. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Diachun A.Ie. & Varian A.R. (2016). Synthesis of screw transport and technological mechanisms with transport casings. *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*, Kharkiv, 168, 149-155 [in Ukrainian].
12. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Diachun A.Ie., Varian A.R., Melnychuk A.L. & Shust I.M. (2017). Generation of structures of screw mechanisms by the method of morphological analysis with hierarchical grouping. *Prospective technologies and devices*, Lutsk, 10, 186-192 [in Ukrainian].

**Ivan Hevko**, Prof., DSc, **Andrii Diachun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Rohatynskyi**, Prof., DSc, **Taras Dovbush**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Buchynskyi**, post-graduate  
*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### **Synthesis of Storage and Loading Hoppers with Elements of Automation**

The purpose of the article is to generate effective designs of storage and loading hopper systems with automation elements based on the application of structural-schematic synthesis by the method of hierarchical grouping using morphological analysis. The use of this method of carrying out structural-schematic synthesis makes it possible to obtain a limited number of design solutions for hoppers, taking into account the gradation of requirements that are applied to them in the process of their development. It allows to significantly save time and resources spent on the search for more effective alternatives.

The generation of efficient designs of storage-loading hopper systems with automation elements was carried out based on the application of structural-schematic synthesis by the method of hierarchical grouping with the help of morphological analysis. As a result of the conducted synthesis, 57 variants of design solutions of storage and loading hoppers were obtained, the schemes of six of them are shown in the figures. Their advantages are the ability to change the volume of accumulation, the possibility of disturbing the bulk medium and avoiding its jamming, ensuring the forced intensive supply of materials when unloading from hoppers, the ability to loosen bulk materials and ensure uniform loading of the conveyor.

A scheme of an automated adaptive limit control system for a screw conveyor with a storage-loading hopper has been developed, which provides a constant value of the given production parameters, in particular, the productivity of bulk materials transportation, the power of the screw drive under the influence of various external factors. By changing the number and composition of the elements of this system, it is possible to generate various design schemes of storage and loading hoppers with automation elements.

**structural-schematic synthesis, accumulation, loading, hopper, element, screw conveyor, automation**

*Одержано (Received) 29.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 09.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 621.87

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.155-163](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.155-163)**В.О. Дзюра**, проф., д-р техн. наук, **Т.Р. Дживак**, асп., **В.Я. Федів**, асп.*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна***І.І. Чвартацький**, доц., канд. техн. наук*Бережанський агротехнічний інститут, м. Бережани, Україна**e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com*

## Трансформація відхилень від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гідроциліндра при його виготовленні

В статті наведено результати визначення точності форми поперечних перерізів та отримано числові значення статистичних характеристик розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра телескопування стріли автомобільного крана КТА-25 після виконання кожної технологічної операції з її оброблення. Визначено вплив технологічних операцій як на величину відхилення від круглості та і переважаючі гармоніки, які вказують на тип відхилення форми. Побудовано полігони розсіювання відхилень від круглості поперечних перерізів гільз циліндрів. Встановлено, що технологічна операція напівчистового розточування суттєво не змінює величину та форму відхилення від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра. Форма відхилення від круглості допоможе встановити дефект верстатного обладнання та запобігти утворенню виявлених відхилень від круглості оброблених поверхонь.

**відхилення від круглості, точність форми, гармоніки, погон розсіювання, внутрішня циліндрична поверхня**

**Постановка проблеми.** Працездатність машини визначається працездатністю основних вузлів та агрегатів, які в свою чергу забезпечуються заданим ресурсом робочих поверхонь відповідальних деталей. У сучасних машинах є велика кількість деталей, де робочими поверхнями є циліндричні поверхні пар тертя. До таких деталей відносяться гільзи двигунів внутрішнього згорання, гільзи гідроциліндрів, амортизаторів та інші. Щоб забезпечити закладений у деталь ресурс необхідно забезпечити закладені конструктором геометричні параметри якості. Від точності виготовлення робочих поверхонь цих деталей залежить надійність деталі і, відповідно, вузла чи агрегату у який вона входить.

Виробництво високоякісних гідроциліндрів для техніки різного призначення залишається однією з найважливіших задач в машинобудуванні. Спеціалізовані підприємства повністю не забезпечують потреби виробників машин [1]. Багато заводів, що випускають спеціалізовану техніку, змушені самостійно виготовляти для неї гідроциліндри. При цьому використовують складні і трудомісткі технології, які вимагають спеціального обладнання та інструменту, екологічно шкідливих діляниць та т.п. Зношеність обладнання, відсутність належної якості комплектуючих і матеріалів, брак фахівців не дозволяють випускати машини сучасного технічного рівня.

Передові закордонні компанії максимально використовують покупні комплектуючі, виготовлені спеціалізованими підприємствами, які досягли досконалості своїх виробів. Одні виробники хонінгують, розвертають або розкатують труби, отримуючи високий рівень чистоти внутрішньої поверхні, інші - обробляють і хромують штоки, забезпечуючи їм необхідну твердість і опір агресивним зовнішнім впливам.

Таким чином підприємства, які виготовляють самі гідроциліндри фактично займаються лише їх складанням. Такий підхід істотно скорочує капіталовкладення у виробництво, оскільки всі операції можуть виконуватися на універсальному обладнанні і не вимагають дорогих спеціальних верстатів, оригінального інструменту і складної оснащення. Виключаються також екологічно шкідливі ділянки та постійна турбота про утилізацію відходів виробництва при хромування штоків.

Використання високоякісних комплектуючих економічно виправдано. Відмова від малоефективних і трудомістких виробничих операцій дає можливість скоротити персонал або переорієнтувати його на інші види робіт. Подібні технології забезпечують високий рівень якості гідроциліндра, підвищують гнучкість виробництва, створюють можливість швидкого розширення асортименту продукції, що випускається [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із головних параметрів якості циліндричних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь гідроциліндрів є точність їх форми у поперечних перерізах, яка визначається таким параметром як відхилення від круглості. Нормування відхилень від круглості регламентовано відповідними стандартами, наприклад ГОСТ 24642-81, і полягає в обмеженні їх допусками. Відхилення від круглості визначаються як максимальні відхилення реальних профілів від вписаного у круглограму кола для внутрішніх циліндричних поверхонь і описаного кола навколо круглограми – для зовнішніх циліндричних поверхонь [5]. Таке подання точності форми з точки зору інформативності є недостатнім і не може бути використано для виявлення і аналізу причини, які впливають на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь. Більш прогресивним у дослідженні точності форм поперечних перерізів циліндричних поверхонь є використання методу апроксимації відхилень радіуса-вектора реального профілю від номінального на проміжку  $[0, 2\pi]$ , як випадкової величини, тригонометричним рядом Фур'є [3]. Для оцінки точності форми циліндричних поверхонь використовують також метод Спрега [5], за яким відхилення від круглості приймають як відхилення радіуса-вектора реального профілю від усередненого номінального профілю. Основним недоліком цього методу є те, що перша гармоніка тригонометричного ряду Фур'є у спектрі гармонік відсутня, а величину ексцентриситету визначають як віддаль між двома центрами двох систем координат. Окрім цього при визначенні дисперсії розсіювання відхилень від круглості апроксимацією тригонометричним рядом Фур'є не враховується амплітуда першої гармоніки, що вносить значну похибку у значення дисперсії.

**Постановка завдання.** Метою завдання є аналіз відхилень від круглості аналіз відхилень від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гідроциліндра при його виготовленні. Цей аналіз включає кілька етапів: аналіз величини відхилень від круглості; побудова полігонів розсіювання відхилень від круглості (визначення законів розподілу) та визначення амплітуд гармонік відхилень від круглості. Побудова полігонів розсіювання дозволить зробити висновок про стабільність технологічного процесу, а розподіл амплітуд гармонік відхилень від круглості – про тип відхилення та природу його походження.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 наведено типову конструкцію плунжерного гідроциліндра виробництва Дрогобицького заводу автомобільних кранів (ДЗАК). Об'єктом досліджень був гідроциліндр КС-4574.63.900 телескопування (випускання) стріли автомобільного крана КТА-25 (рис. 1).

До поверхні гільзи гідроциліндра, ставляться високі вимоги по точності форми, а саме – відхилень від прямолінійності в повздовжньому та відхилень від круглості в поперечному перерізі. Такі вимоги до гідроциліндрів обумовлені тим, що їх експлуатація не

допускає перетікання робочої рідини з однієї порожнини в іншу. Технічні вимоги до гідроциліндрів регламентуються ДСТУ 2351-94 (ГОСТ 30074-93).

При виготовленні гільзи циліндра необхідно забезпечити виготовлення внутрішнього отвору гільзи циліндра піднімання стріли автокрана в розмір  $\varnothing 100\text{H}9$  з шорсткістю поверхні  $Ra=0,32$  мкм, точність внутрішнього діаметра гільзи по 5, 6 квалітету, овальність конусність в межах 0,01мм.



Рисунок 1 – Гідроциліндр плунжерний КС-4574.63.900 телескопування стріли автомобільного крана КТА-25

Джерело: на підставі [1]

Заготовками для гідроциліндрів є безшовні холодно-тягнуті труби хонінговано або поліровані у відповідності до ISO H8, а також зварні холодно-тягнуті труби, оброблені по внутрішньому діаметру у відповідності до ISO H9 або ISO H10. Для виготовлення гідроциліндрів використовують сталі марок: St 52, St 52.3, St E 460 згідно DIN 2393-1994 та DIN 17102 виготовлені в Німеччині. Аналогами для матеріалу St 52 та St 52.3 в Україні є сталі 17Г1С та 17ГС, а для сталі St E 460 – 18Г2АФпс.

Режими оброблення внутрішньої циліндричної поверхні гільзи циліндра представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Режими обробки гільзи гідроциліндра КС-4574.63.900-05 телескопування стріли крана КТА-25

| № п/п | Операції механічної обробки | Діаметр $D$ , мм | Довжина $L$ , мм | Припуск, $z$ , мм | Подача $S_m$ , мм/хв | К-ть об $n$ , об/хв | Швидкість $V$ , м/хв |
|-------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1     | Чорнове розточування        | 99,5             | 6765             | 5,25              | 50                   | 200                 | 62,5                 |
| 2     | Напівчистове розточування   | 99,96            | 6765             | 0,23              | 160                  | 400                 | 78,5                 |
| 3     | Чистове розточування        | 100              | 6765             | 0,02              | 60                   | 200                 | 62,8                 |

Методика проведення дослідження була наступною. Для отримання статистично достовірних результатів значень відхилень від круглості поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь та їх статистичних характеристик (дисперсії, середнього арифметичного відхилення, середнього квадратичного відхилення та максимальних значень) було вирішено провести вимірювання відхилень від круглості

на п'яти трасах, що дозволило отримати по п'ять круглограм для кожної технологічної операції. Мала кількість трас вимірювання нівелюється використанням теорії малої вибірки та спеціально розробленим програмним забезпеченням для визначення статистичних характеристик розсіювання відхилень від круглості [3].

Таблиця 2 – Значення відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь гільз гідроциліндрів після виконання кожної технологічної операції

| №<br>полож. | Відхилення після<br>чорнової обробки<br>$\Delta_{\text{чорн.}}$ , мкм | Відхилення після<br>напівчистої обробки<br>$\Delta_{\text{напівчист.}}$ , мкм | Відхилення після<br>чистої обробки<br>$\Delta_{\text{чист.}}$ , мкм |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 0           | 42,48                                                                 | 36,26                                                                         | 12,5                                                                |
| 1           | 43,32                                                                 | 35,38                                                                         | 9,26                                                                |
| 2           | 35,3                                                                  | 32,56                                                                         | 10,02                                                               |
| 3           | 24,88                                                                 | 19,16                                                                         | 12,22                                                               |
| 4           | 24,72                                                                 | 6,22                                                                          | 12,7                                                                |
| 5           | 14,1                                                                  | 2                                                                             | 2,66                                                                |
| 6           | 5,88                                                                  | 4,5                                                                           | 6,34                                                                |
| 7           | 1,98                                                                  | 5,66                                                                          | 9,34                                                                |
| 8           | 1,84                                                                  | 0                                                                             | 4,2                                                                 |
| 9           | 7,84                                                                  | 5,78                                                                          | 7,1                                                                 |
| 10          | 10,62                                                                 | 8,8                                                                           | 19,78                                                               |
| 11          | 14,44                                                                 | 9,5                                                                           | 18,34                                                               |
| 12          | 9,92                                                                  | 14,32                                                                         | 12,84                                                               |
| 13          | 7,94                                                                  | 11,42                                                                         | 8,22                                                                |
| 14          | 2,9                                                                   | 6,54                                                                          | 13,2                                                                |
| 15          | 5,94                                                                  | 2,96                                                                          | 8,76                                                                |
| 16          | 8                                                                     | 3,78                                                                          | 9,72                                                                |
| 17          | 6,68                                                                  | 6,08                                                                          | 4,64                                                                |
| 18          | 1,66                                                                  | 11,5                                                                          | 1,88                                                                |
| 19          | 1,04                                                                  | 7,9                                                                           | 7,1                                                                 |
| 20          | 4,34                                                                  | 2,76                                                                          | 15,56                                                               |
| 21          | 3,72                                                                  | 4,56                                                                          | 13,52                                                               |
| 22          | 6,78                                                                  | 2,64                                                                          | 14,98                                                               |
| 23          | 4,88                                                                  | 3,26                                                                          | 24,66                                                               |
| 24          | 2,38                                                                  | 5,16                                                                          | 28,16                                                               |
| 25          | 2,08                                                                  | 9,74                                                                          | 22,74                                                               |
| 26          | 1,86                                                                  | 6,96                                                                          | 26,16                                                               |
| 27          | 2,26                                                                  | 3,48                                                                          | 14,42                                                               |
| 28          | 6,88                                                                  | 2,34                                                                          | 4,68                                                                |
| 29          | 8,4                                                                   | 4,22                                                                          | 1,36                                                                |
| 30          | 6,14                                                                  | 0,5                                                                           | 5,74                                                                |
| 31          | 7,46                                                                  | 5,54                                                                          | 5,82                                                                |
| 32          | 12,04                                                                 | 16,14                                                                         | 2,86                                                                |
| 33          | 20,62                                                                 | 31,3                                                                          | 6,5                                                                 |
| 34          | 34,94                                                                 | 33,94                                                                         | 8,44                                                                |
| 35          | 35,02                                                                 | 32,28                                                                         | 17,26                                                               |

Джерело: розроблено на підставі [3]

Усереднені розгортки круглограм відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь гільз циліндрів, отримані після виконання кожної технологічної операції представлено на рис. 2.

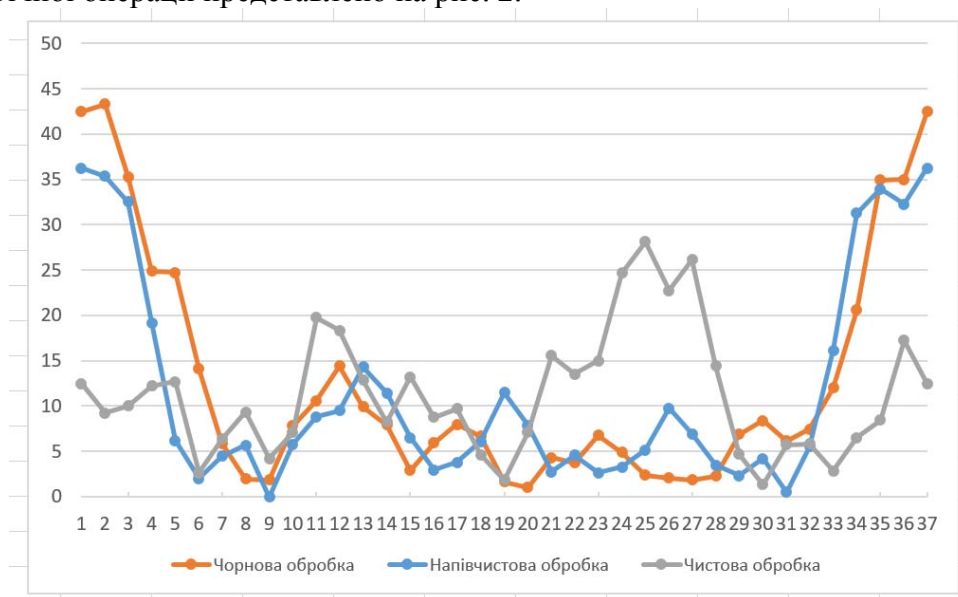


Рисунок 2 – Усереднені розгортки круглограм внутрішніх циліндричних поверхонь гільз гідроциліндрів отримані після виконання кожної технологічної операції

Джерело: розроблено авторами

Для отриманих значень відхилень від круглості визначаємо середнє арифметичне відхилення за формулою

$$\bar{\Delta} = \sum_{i=1}^{36} \Delta_i . \quad (1)$$

Отримані значення для різних видів обробки заносимо в таблицю 2.

Для отриманих значень відхилень визначаємо дисперсію за формулою:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{36} (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2}{n} , \quad (2)$$

де  $n$  – кількість виміряних відхилень,  $n = 36$ .

Отримані значення для різних видів обробки заносимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики відхилення від круглості  $\Delta$  внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра

| № п/п | Операції механічної обробки | Середнє значення $\bar{\Delta}_i$ , мкм | Дисперсія $D$ , мкм <sup>2</sup> | Середнє квадратичне відхилення $\sigma$ , мкм |
|-------|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1     | Чорнове розточування        | 11.98                                   | 150,89                           | 12,28                                         |
| 2     | Напівчистове розточування   | 10.97                                   | 122,91                           | 11,08                                         |
| 3     | Чистове розточування        | 11.2                                    | 47,99                            | 6,92                                          |

Визначаємо середнє квадратичне відхилення для отриманих значень відхилень

$$\sigma = \sqrt{D} , \quad (3)$$

Побудова полігону розсіювання відхилень від круглості допоможе оцінити стабільність розподілу відхилень у поперечному січенні в діапазоні від 0 до 360°. а також частково відобразить закон розподілу відхилень від круглості поперечних перерізів циліндричних поверхонь. Суть методу полягає у поділі діапазону значень між максимальним та мінімальним відхиленням на рівну кількість інтервалів та виявленні розподілу відхилень між цими інтервалами [5]. На відміну від нормального закону розподілу, при оцінюванні відхилень від круглості, рівномірність розподілу відхилень між інтервалами свідчить про нестабільність забезпечення точності технологічної операції. Чим більше відхилень потрапляють в один найменший діапазон значень тим вищу точність забезпечує виконання технологічної операції.

Будуємо полігон розсіювання

Визначаємо розмах  $R$  інтервалу за формулою

$$R = \Delta_{\max} - \Delta_{\min} . \quad (1)$$

Кількість інтервалів визначаємо за формулою:

$$n = 1 + 3.322 \cdot \log N . \quad (2)$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою

$$h = (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) / n . \quad (3)$$

Будуємо полігон розсіювання для деталі після чорнової обробки.

Для нашого випадку всі круглограми після чорнової, напівчистої і чистої обробки поділені на 36 частин, тому кількість інтервалів буде рівна  $n = 1 + 3.322 \cdot \log 36 = 6,17$ . Приймаємо 6 інтервалів.

Визначаємо розмах інтервалу розсіювання для чорнової обробки за формулою (1)

$$\Delta_{\max} = 43,32, \Delta_{\min} = 1,04.$$

$$R = 43,32 - 1,04 = 42,28$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою (3)

$$h = (43,32 - 1,04) / 6 = 7,046.$$

Будуємо полігон розсіювання (рис.3).

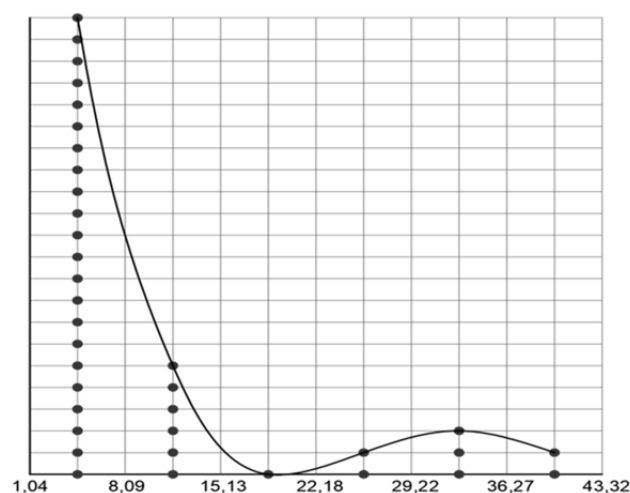


Рисунок 3 – Полігон розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра після чорнової обробки

Джерело: розроблено авторами

Визначаємо розмах інтервалу розсіювання за формулою (1)

$$\Delta_{\max} = 36,26, \Delta_{\min} = 0.$$

$$R = 36,26 - 0 = 36,26$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою (3)

$$h = (36,26 - 0) / 6 = 6,043.$$

Будуємо полігон розсіювання (рис.4).

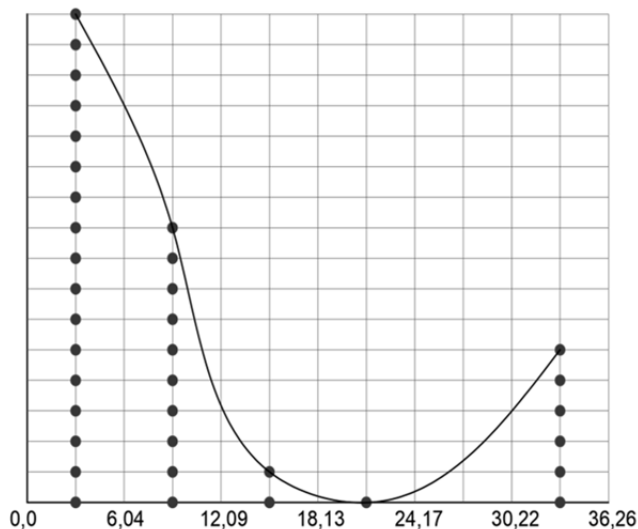


Рисунок 4 - Полігон розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра після напівчистової обробки

Джерело: розроблено авторами.

Будуємо полігон розсіювання для поверхні після чистової обробки.

$$\Delta_{\max} = 28,16, \Delta_{\min} = 1,36.$$

$$R = 28,16 - 1,36 = 26,8$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою (3)

$$h = (28,16 - 1,36) / 6 = 4,466.$$

Будуємо полігон розсіювання (рис.5).

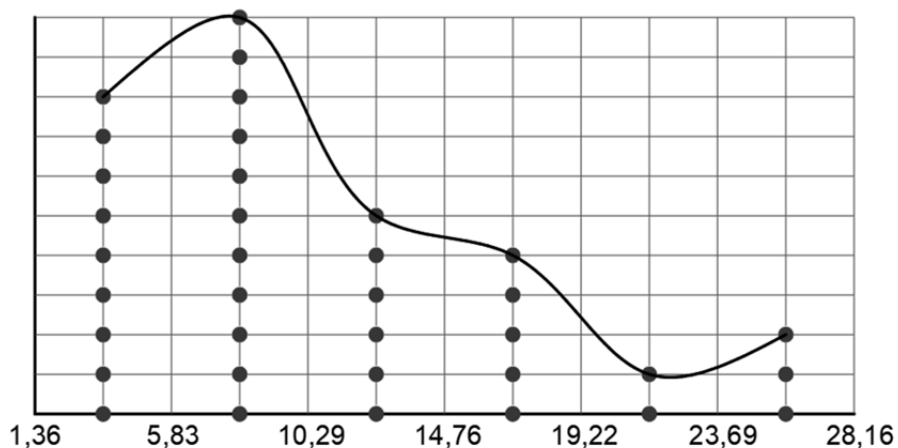


Рисунок 5 - Полігон розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра після чистової обробки

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рис. 3 більшість відхилень потрапила у перший діапазон, що свідчить про відмінну забезпеченість точності для цієї операції. Однак наявність кількох високих значень відхилень від круглості свідчить про те, що технологічне обладнання має виробничий чи експлуатаційний дефект у вигляді радіального биття. Аналогічна ситуація спостерігається і після виконання операції напівчистового розточування.

Для отримання гармонік круглограм відхилень від круглості використано математичний апарат та відповідне програмне забезпечення для його реалізації, яке представлено в роботі [3]. При проведенні даного дослідження ми обмежились першими десятима гармоніками, що достатньо для відхилень від круглості поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

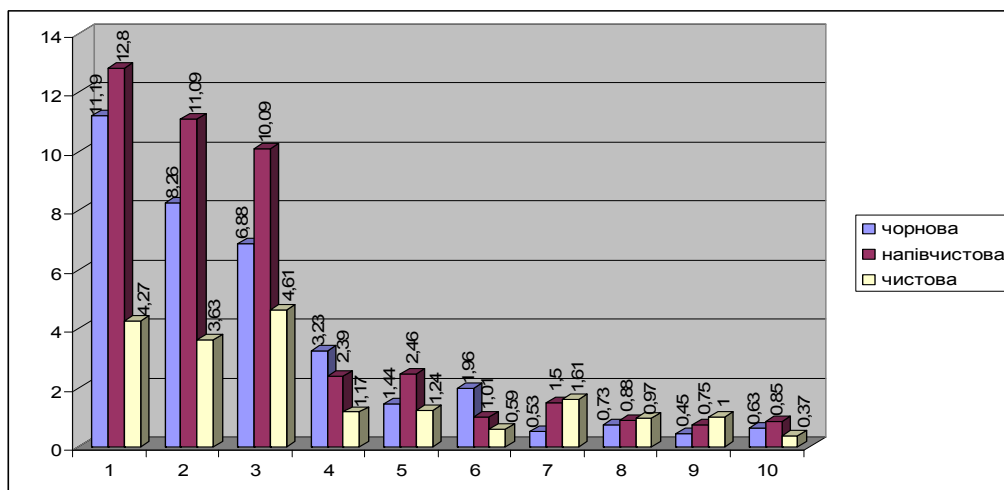


Рисунок 6 - Розподіл амплітуд гармонік відхилень від круглості поперечних перерізів внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра при виконанні технологічних операцій

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рис. 6 після виконання чорнового та напівчистового розточування в розподілі амплітуд гармонік відхилень від круглості переважає перша гармоніка. Це свідчить про те, що при виконанні операцій лезового оброблення на верстаті має місце радіальне биття шпинделя. Наслідком цього є сформована ексцентричність обробленої поверхні. Після виконання фінішної операції – чистового розкатування в розподілі амплітуд гармонік відхилень від круглості починає переважати третя гармоніка.

**Висновки:** 1. Під час виконання операцій технологічного процесу виготовлення гільзи гідроциліндра точність форми його внутрішньої циліндричної поверхні змінюється, причому форма відхилень від круглості зберігається після виконання перших двох операцій. Це свідчить про наявність явища технологічної спадковості.

2. Величина відхилень від круглості після виконання операції напівчистового розточування суттєво не зменшується при збереженій формі відхилення, що свідчить про її неефективність з точки зору впливу на точність форми поперечних перерізів при обробленні внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра.

## Список літератури

1. Офіційний сайт Дрогобицького заводу автомобільних кранів. URL: <http://www.dak.com.ua/uk> (дата звернення: 29.11.2024).
2. Dzyura V., Marusyak P., Kuchvara I., Tkachenko I. *Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies*. Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering, 2021. VOL 71 (2021), NO 1. С. 41 – 50. eISSN 2450-5471.

3. Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., Krupa V.V. *Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces*. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 2014. P. 9–13. ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946.
4. *Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь тіл обертання технологічними методами* : дис... докт. техн. наук: 05.02.08 / Дзюра Володимир Олексійович ; НУ «Львівська політехніка». Л., 2021. 413 с.
5. В.О. Дзюра, П.О. Марущак, В.О. Семенен, В.В. Головка, В.Я. Федів. Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. I. С.37-47. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.37-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.37-47).

## References

1. Drohobych Automotive Cranes Plant. (n.d.). *Official website of Drohobych Automotive Cranes Plant*. Retrieved November 29, 2024, from <http://www.dak.com.ua/uk>
2. Dzyura V., Maruschak, P., Kuchvara I., & Tkachenko I. (2021). *Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies*. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*. VOL 71, NO 1. P. 41 – 50. eISSN 2450-5471.
3. Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., & Krupa V.V. (2014). *Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces*. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 9–13, ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946.
4. *Scientific bases of ensuring the quality parameters of the working surfaces of the bodies of rotation by technological methods*: dis... doc. technical Sciences: 05.02.08 / Dzyura Volodymyr Oleksiyovych; NU "Lviv Polytechnic". L., 2021. 413 p. [in Ukrainian].
5. Dzyura V., Maruschak, P., Semehen V., Golovko V., & Fediv V. (2023) Justification of the parameters of regular microreliefs formed on flat surfaces. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Vol. 8(39), I. P. 37-47. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.37-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.37-47). [in Ukrainian].

**Volodymyr Dzyura**, Prof., DSc., **Taras Dzhvyak**, post-graduate, **Vasyl Fediv**, post-graduate

*Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine*

**Ihor Chvartazkuy**, Assoc. Prof., Ph.D.

*Berezhany Agrotechnical Institute, Berezhany, Ukraine*

## Transformation of Deviations from the Roundness of the Inner Cylindrical Surface of the Hydraulic Cylinder During Its Manufacture

The article presents the results of determining the accuracy of the shape of the cross-section and obtained numerical values of the statistical characteristics of dispersion of deviations from the roundness of the surface of the cylinder sleeve of the telescoping boom of the KTA-25 automobile crane after each technological operation of its processing.

The impact of technological operations on the amount of deviation from roundness and the prevailing harmonics, which indicate the type of shape deviation, is determined. Moreover, the form of deviations from roundness is preserved after the first two operations. This indicates the presence of the phenomenon of technological heredity. Polygons for scattering deviations from roundness were built for deviations from roundness after each technological operation. It was established that the technological operation of semi-clean boring does not significantly change either the size or the shape of the deviation from the roundness of the inner cylindrical surface of the hydraulic cylinder sleeve.

The shape of the deviation from roundness will help to establish the defect of the machine tool and prevent the formation of detected deviations from the roundness of the processed surfaces. After performing rough and semi-finish boring, the first harmonic prevails in the distribution of amplitudes of harmonics of deviations from roundness. This indicates that during blade processing operations on the machine tool, radial beating of the spindle takes place.

The consequence of this is the formed eccentricity of the treated surface. After performing the finishing operation - final rolling, the third harmonic begins to prevail in the amplitude distribution of harmonics of deviations from roundness. It was established that the amount of deviations from roundness after the semi-clean boring operation does not significantly decrease with the shape of the deviation preserved, which indicates its ineffectiveness in terms of influence on the accuracy of the shape of the cross-sections when processing the inner cylindrical surface of the hydraulic cylinder sleeve.

**deviation from roundness, accuracy of form, harmonics, dispersion shoulder, inner cylindrical surface**

*Одержано (Received) 17.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 69.002.5:678:691.173.175

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.164-179](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.164-179)

**С.О. Карпушин**, доц., канд. техн. наук, **В. А. Настоящий**, проф., канд. техн. наук,  
**А. А. Тихий**, доц. канд. техн. наук, **Є. В. Гозбенко**, магістр

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

*e-mail: karp22.05.1972ksa@gmail.com*

**О.В. Русаченко**, асп.

*ДВНЗ Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, Україна*

## Удосконалення робочих органів будівельних і дорожніх машин застосуванням гумових елементів

У статті представлено ряд пропозицій технічних рішень, що мають елементи робочих органів будівельних і дорожніх машин, які виготовлені з гуми, і призначені для взаємодії з мінеральним природним середовищем, типу ґрунт, гірська порода, руда, корисна копалина, сніговий покрив та льодові утворення. Проаналізована ефективність застосування гумових елементів у робочому обладнанні на прикладі широкого спектру дорожньо-будівельних і транспортувальних машин за критеріями: зношування, налипання, намерзання, демпфування, корозійної стійкості, захисту металевих елементів конструкцій від пластичних деформацій.

**мінеральне середовище, еластомір, гумовий елемент, робочий орган, полідеформаційні процеси, зношування, робочий процес, конструкція**

**Постановка проблеми.** Робочі органи будівельних і дорожніх машин, у більшості випадків, призначені для взаємодії з нескельними ґрунтами, гірською кусковою породою, сумішшю мінеральних елементів з незначними включеннями органіки за умов різних вологостей і температур (як правило в межах  $-40...+60^{\circ}\text{C}$ ) та призначені для відділення, розпушення, транспортування, переміщення, планування, сортування, змішування, дроблення, ..., мінерального середовища.

Волога, що міститься в розроблюваному середовищі в поєднанні з високими питомими значеннями контактного тиску та температурою, обумовлює такі негативні ефекти, як налипання та намерзання розроблюваного середовища до металевих поверхонь робочих органів. В робочих органах ковшового типу (одноківшеві екскаватори, фронтальні навантажувачі, скрепери, кузови автосамоскидів) спостерігається адгезійна консолідація масивів розроблюваного середовища в криволінійних ділянках ковшів та місцях примикання днища до бокових стінок. Для класичних автосамоскидів проблемним є вивантаження нескельного мінерального матеріалу без прилипання та примерзання до металевих поверхонь вантажної платформи ковшового типу. Для кар'єрних автосамоскидів проблемним моментом є також процес завантаження скельної породи в металевий кузов, що супроводжується значними динамічними навантаженнями, підвищеним шумом, пластичною деформацією кузова, підвищеним зносом. Ці питання залишаються актуальними, як для вітчизняних машин, так і для закордонних сучасних автосамоскидів. Окрім зниження продуктивності в наслідок налипання та намерзання, це також питання безпеки (стійкість автосамоскида при вивантаженні), ресурс та довговічність машин.

До головних складових мінерального середовища, що розроблюється і транспортується робочими органами будівельних і дорожніх машин, входять частки з кварцу, слюди, польового шпату, ..., [1]. Саме ці мінеральні елементи, їх співвідношення та ступінь зв'язності, обумовлюють фізико-механічні властивості розроблюваного середовища, яке є визначним для проєктування робочих органів. Головним за твердістю та вмістом в піщаних та суглинистих ґрунтах є частки кварцу ( $\text{SiO}_2$ ), що мають твердість 7,0-7,25 за шкалою Мооса, яка в 2-3 рази більша твердості конструктивних металевих елементів робочих органів. Як наслідок, 80% від загальної кількості поломок будівельних і дорожніх машин припадає на знос основних елементів робочих органів. Це: різальні ножі, наконечники розпушувачів, змішувальні лопаті, робочі поверхні елементів дроблення, вигладжувальні бруси, поверхні відвалів, ковшів, тощо. За усередненими даними, швидкість зносу знаходиться в межах від 5 до 400 мкм/год.

Подальше збільшення твердості металевих робочих органів призводить до збільшення їх крихкості та руйнування в процесі динамічних навантажень при взаємодії з високодисперсним мінеральним, або мерзлим середовищем.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомий вдалий та широкий практичний досвід застосування у різних галузях промисловості гумових елементів, що безпосередньо контактують з абразивним мінеральним середовищем і при цьому мають антикорозійні, демпфуючі властивості, властивості самоочищення від налиплих, намерзлого матеріалу, властивості суцільності, гнучкості, пружності, газу, водонепроникності [1-5]. Прикладами вдалого застосування гуми для контакту з абразивним та липким мінеральним середовищем можуть бути: позитивний досвід застосування гумотканинних стрічок в стрічкових конвеєрах; гумові шини в автомобільному і авіаційному транспорті; гумові футеровки в кульових млинах для подрібнення і тонкого помолу мінеральних корисних копалин; гумове футерування кузовів автосамоскидів, гумові елементи робочих органів комунальних, зокрема снігоприбиральних машин [6].

Гума представляє собою продукт переробки каучуків з додаванням сірки (вулканізація) і має в складі близько 15-20 інгредієнтів [1-5]. Гума — це еластомірний конструкційний матеріал, що характеризується:

- високою пружністю, або еластичністю (пружне видовження при розтягуванні може досягати 700...800%);
- здатністю багаторазового змінювання своєї форми з поверненням у вихідний стан;
- високою в'язкістю (наномодифікована гума має в'язкість 5,0...15,2 Муні);
- здатністю безшумно поглинати удари;
- високою зносостійкістю;
- міцністю на розрив 15-30 МПа;
- твердістю по Шору до 60 од.;
- корозійною стійкістю до дії води, кислот і лугів;
- теплостійкістю від -45 до +110°C;
- коефіцієнтом теплопровідності 2,2~6,28 Вт/м 2.0К при товщині 25 мм;
- можливістю адаптуватися під форму робочого органу, або під форму розроблюваної поверхні з різною твердістю та міцністю;
- щільністю близько 1200 кг/м<sup>3</sup>;
- модулем пружності при малих деформаціях  $E=1-10$  МПа,
- коефіцієнтом Пуассона  $\mu=0,4-0,5$ ;
- співвідношенням модуля пружності  $E$  і модуля зсуву  $G$ :  $E=3G$ .

Перераховані фізико-механічні та хімічні властивості гуми свідчать про істотні перспективи щодо подальшого застосування даного конструкційного матеріалу для удосконалення робочих органів і процесів будівельних та дорожніх машин. Це може бути досягнене також створенням спеціальних композитних гумових сполук [4, 5].

Проаналізовано також ряд наукових робіт направлених на встановлення фізичної сутності та механізмів абразивного зносу гумових поверхонь [7]. В роботі [7] запропоновано стенд для експериментальних досліджень полідеформаційних процесів гумової поверхні, що контактує з абразивним середовищем, описано методологію проведення експериментальних досліджень та розроблені теоретичні залежності щодо визначення величини абразивного зносу гумових поверхонь.

**Постановка завдання.** Метою досліджень є розробка пропозицій з удосконалення робочих органів будівельних і дорожніх машин, що взаємодіють під час свого робочого циклу з мінеральним середовищем (грунт, руда, кускова скельна порода, бетон, асфальтобетон), органічним середовищем при низьких температурах (сніг, крига, та їх суміші з мінеральним середовищем) застосуванням гумових, гумотканинних, гумо-металевих, гумо-бетонних та інших композитних гумових сполук.

**Виклад основного матеріалу.** Еластоміри, на основі гуми (каучуку), знаходять все більш широке застосування в різноманітних галузях промисловості. Це машинобудування, будівництво, медицина, енергетика, космічна промисловість та ін.

Широке застосування еластомірних матеріалів пояснюється рядом унікальних властивостей, якими вони володіють, а насамперед, їх високою еластичністю, здатністю до великих зворотних деформацій, низькою швидкістю розвитку деформацій. Окрім цього, гумові деталі та елементи володіють високою працездатністю в умовах динамічних навантажень, мають властивість поглинати і розсіювати механічну енергію в широкому діапазоні температур, володіють гарними зносостійкими характеристиками, мають можливість до самоочищення від налиплого мінерального середовища.

Тобто, на відміну від інших матеріалів, при прикладанні навантаження до гуми можна говорити не про два види деформації (пружна і пластична), а про три: пружна деформація; високоеластична деформація і пластична деформація [2].

Пружна деформація для гуми аналогічна пружній деформації твердих тіл, зворотня і пов'язана зі зміною міжмолекулярних і міжатомних відстаней, а також кутів, утворених валентними зв'язками, що з'єднують атоми в молекулах. Розвиток пружної деформації супроводжується зміною внутрішньої енергії системи.

Високоеластична деформація характерна лише для полімерів у високоеластичному стані, також зворотня, але пов'язана зі зміною конфігурації макромолекул, тобто зі зміною ентропії системи. Увесь комплекс унікальних механічних властивостей каучуків і гум визначається деформацією саме цього типу.

Пластична деформація пов'язана з незворотнім переміщенням макромолекул одних відносно інших. Особливо важливу роль вона грає в каучуках і сирих гумових сумішах. Наявність тривимірної сітки поперечних зв'язків перешкоджає розвитку цього виду деформації. Пластична деформація може мати місце лише при старінні гуми.

Всі, без виключення, характеристики еластомірів є нагальними для оптимізації взаємодії з мінеральним середовищем, і можуть з користю бути застосовані в «проблемних місцях» робочих органів будівельних і дорожніх машин.

Варто зауважити, що практичне застосування гумових елементів, саме в робочих органах будівельних і дорожніх машин, консервативно обмежене. На практиці, а також на різноманітних відео з YouTube [8] та фото, можна спостерігати кустарне застосування відпрацьованих автомобільних покришок в якості демпферів на буферах

скреперів (рис.1), у наголовниках копрових установок, відбійників на рампах, причалах. Виключеннями є масове виготовлення і використання шин та гумо-тканинних конвеєрних стрічок.



Рисунок 1 – Застосування відпрацьованих автомобільних покришок на буфері самохідного скрепера МоА3-6014, м. Берегово Закарпатська обл. 2021р.

*Джерело: на підставі [8]*

Також відомі спроби застосування гумових сит для грохотів в дробарно-сортувальних установках, де реалізовано ефект коливання-перекочування (еліпсоподібна траєкторія) мінеральних часток по поверхні сита. Загально відомо, що саме перекочування, а не ковзання абразивного і більш твердого матеріалу по гумовій поверхні сприятиме умовам мінімального зносу гумової робочої поверхні.

Починаючи з 70-х років минулого століття гуму стали використовувати як альтернативний футерувальний матеріал для кульових млинів (рис.2) при подрібненні або тонкому перемелюванні мінерального середовища. Створення гумової робочої футерувальної поверхні замість сталевих бронеплит дозволило одночасно покращити ряд важливих параметрів. Це: зменшення енерговитрат на обертання барабану в наслідок зменшення ваги самої футеровки в 6,0...6,5 разів; зменшення динамічних навантажень від падіння металевих куль та технологічних кусків породи при самоподрібненні; зменшення шуму роботи кульового барабанного млина; зменшення вартості самого комплекту футеровки і працездатності з його заміни.



Рисунок 2 – Робоча поверхня барабанного млина, що облаштована гумовими футерувальними плитами (без ліфтерів)

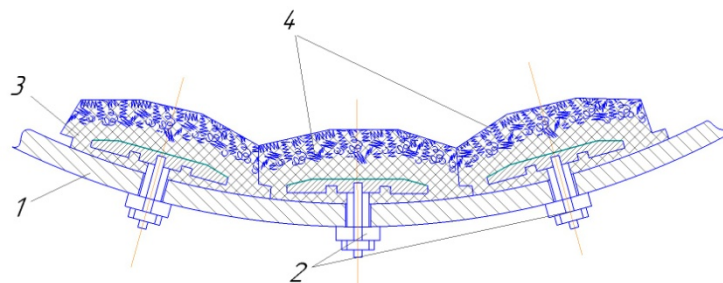
*Джерело: на підставі [9]*

Недоліками перших еластичних (гумових) не армованих футеровок є недостатня зносостійкість за умови низьких кутів атаки абразивних часток, що супроводжується зрізом або відривом гуми (полідеформаційний процес з утворенням коротких подряпин).

Проведений патентний огляд з питання застосування гумових футеровок для барабаних млинів [6, 10-13] показав, що процес удосконалення гумових футеровок та їх елементів активно продовжується до теперішнього часу. Ведуться пошукові роботи щодо створення раціональної форми поверхні футеровки та розробка більш зносостійких і довговічних композитних футеровок на основі з еластичного матеріалу, що армовані розноманітними зносостійкими включеннями в основний шар гуми (металеві стержні, «каблуки», шипи, ...). Також відомі спроби підвищення зносостійкості гумових футерувальних елементів шляхом створення дискретно-комірчастої робочої поверхні футерувальних плит з метою самофіксації (застрягання) в конусних комірках дроблячих металевих куль [6].

Недоліками сучасних (композитних) гумових футеровок є «високий показник дискретності» самофіксованих металевих включень, пришвидшене руйнування гумової футеровки навколо конусних комірок, що може бути пояснено тривалим домінуванням напружень розтягу в гумі, а також створення сприятливих умов для нерівномірного зносу дроблячих куль у формі «кінського зуба» (частина дроблячої металевої кулі за винятком стертого сектору з рваними і гострими крайками), що є причиною найбільш інтенсивного, критичного зносу гумової футеровки.

На підставі аналізу теоретичних положень і практичного досвіду застосування гумових футеровок, авторами запропоновано армувати лише робочий шар гумової футеровки сталевими дискретними елементами (рис.3) [10, 13], що мають виту, спіральну, циліндричну та замкнену форми і розміщені у верхніх шарах робочої поверхні плит у хаотичному порядку, причому відношення діаметру до довжини армувального елемента дорівнює 1,0 і складає 0,25 товщини футерувальної плити із загальною товщиною армованої зони до 0,6 товщини футерувальної плити. Самі ж сталеві дискретні елементи рекомендується виготовлювати з середньовуглецевої сталі з рифленою зовнішньою поверхнею для більш надійної фіксації в еластомірному середовищі.



1 – металевий барабан млина; 2 – елементи кріплення; 3 – гумові футерувальні плити;  
4 - сталеві дискретні елементи, що мають виту, спіральну, циліндричну та замкнену форми

Рисунок 3 – Футеровка барабанного млина [10]

*Джерело: розроблено авторами*

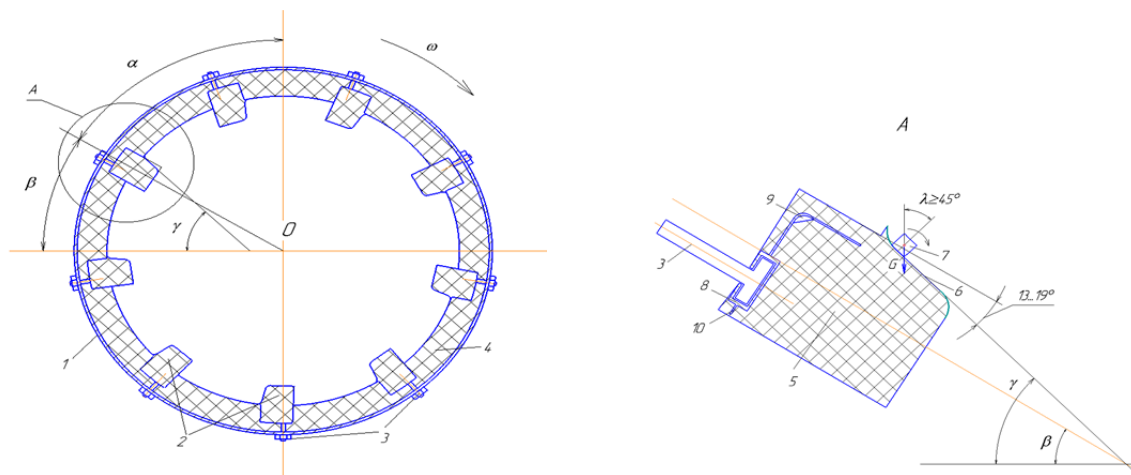
Найбільш несприятливим для гумової футеровки є каскадний режим (некатарактний), що характеризується низькою швидкістю обертання барабана 1, при якій кульова маса разом з матеріалом, що дробиться зміщена в барабані на деякий кут, в бік напрямку обертання барабана 1. Величина даного умовного кута обумовлена силами тертя між матеріалом, що подрібнюється і робочою поверхнею футерувальних плит 3, що армовані сталевими дискретними елементами 4, що мають виту, спіральну, циліндричну та замкнену форми. Частково сталеві дискретні елементи 4 оголюються з гуми футерувальної плити в наслідок полідеформаційного процесу зрізу або відриву гуми за умови низьких кутів атаки абразивних часток і вступають в процес тертя.

Хаотичне розташування і вита, спіральна, циліндрична і замкнена форма дискретних сталевих елементів 4 в тілі гумової футерувальної плити 3 дозволяють створити велику кількість металевих поверхонь для контактної взаємодії з абразивним середовищем.

Хаотичне розташування, вита, спіральна, циліндрична і замкнена форма дискретних сталевих елементів 4 та їх рифлена поверхня на відміну від існуючих армувальних елементів у вигляді: «каблуків», «стержнів», «шипів», забезпечує «низький показник дискретності» зносостійких включень в робочій поверхні гумової футеровки 3. При цьому, за умови великої кількості зносостійких поверхонь та їхніх площ, досягається ефект гарної самофіксації даних армувальних елементів 4 в еластичному матеріалі футеровки 3. Також варто відмітити можливість ефективної роботи еластичного матеріалу в поєднанні з дискретними сталевими елементами 4 витої, спіральної, циліндричної і замкненої форми при ударних навантаженнях. Окремою перевагою армування даного типу є також його економічна дешевизна. Для виготовлення футерувальних плит не потрібні додаткові спеціальні пристосування, фіксатори, позиціонери тощо, процес виготовлення – класичний. Виті, спіральні елементи можуть бути виготовлені вручну з недорогого матеріалу, в тому числі і із вторинної сировини.

Таким чином, застосування запропонованої конструкції дозволить інтенсифікувати процес подрібнення, досягти підвищення зносостійкості футеровки з еластичного матеріалу та зменшити вартість футеровки барабанного млина.

Для футеровок, що створюють хвилову внутрішню поверхню і мають в своєму складі ліфтери, авторами запропонована конструкція, що реалізує принцип перекошування абразивних елементів мінерального середовища по найбільш навантаженому елементу гумової футеровки – ліфтеру (рис.4).



1 – металевий барабан млина; 2 – ліфтери; 3 – елементи кріплення; 4 – гумові футерувальні плити;  
5 – еластична гума; 6 – *S* – подібна форма робочої поверхні ліфтера, що контактує з матеріалом та  
призначена для перекошування часток матеріалу; 7; 8 – *P* – подібний профіль для кріпильних елементів;  
9 – *G* – подібна пластина; 10 – прямолінійна пластина

Рисунок 4 – Гумова футеровка з ліфтерами (Заявка на корисну модель u 2024 04013 від 09.08.2024.

Автори: Настоящий В.А, Карпушин С.О., Русаченко О.В.).

Джерело: розроблено авторами

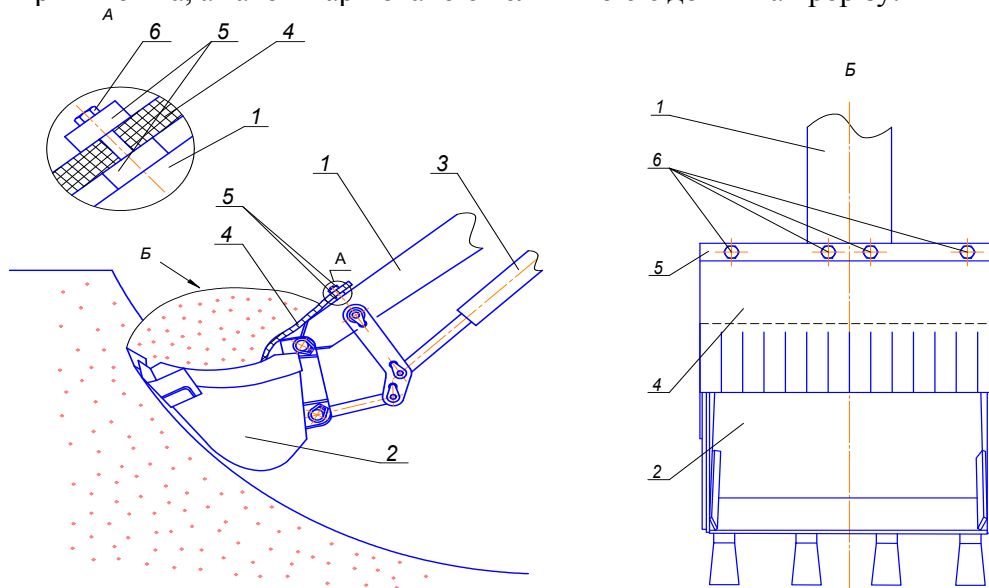
Тривала практика показала, що в подібних конструкціях футеровок довговічність визначається терміном служби ліфтера 2. В комплект футеровки барабанного млина зазвичай до одного комплекту футерувальних плит 4 поставляють два - три комплекти ліфтерів 2. У зазначеній конструкції футеровки, ліфтер 2

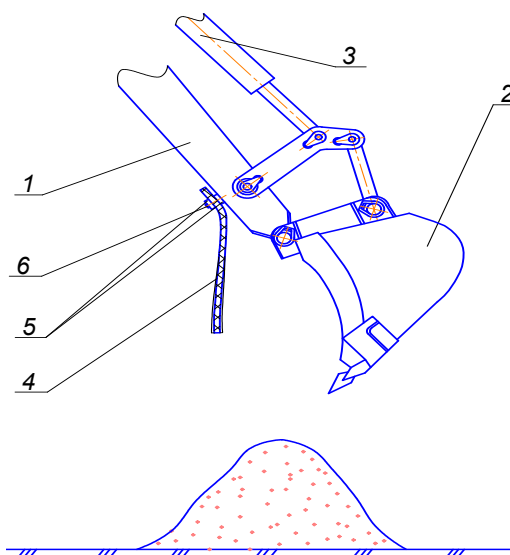
перешкоджає ковзанню дробленого середовища по поверхні футеровки 4, знижуючи швидкість її зносу, сприяє збільшенню висоти підйому технологічної маси, а сам піддається розтягувально-згинальним напруженням під час входу/виходу ліфтера з маси технологічного завантаження. В наслідок цього, ліфтер 2 інтенсивно піддається зносу та відриву еластичного матеріалу 5 від металевої арматури 8 *П* - подібного профілю для кріпильних елементів 3.

Пропонована конструкція ліфтера барабанного млина представляє собою прямокутний брус, виконаний з еластичного матеріалу (гуми) 5, що має нижню основу, робочі верхню і бічні поверхні та вузол кріплення. Особливістю є те, що робоча бічна поверхня (рис. 4) разом з верхньою робочою поверхнею утворюють складну криволінійну *S* - подібну форму поверхні 6 для кочення зі скосом 13-19°, неробоча бічна поверхня ліфтера прямолінійна, а металева пластина 9 для поєднання металевого цільного профілю 8 з еластичним матеріалом 5 виконана *Г* - подібною та перфорованою. Також, *S* - подібна форма поверхні 6 для кочення включає одну прямолінійну і дві криволінійні ділянки, що мають радіуси кривизни 90-110 мм.

Теоретичним обґрунтуванням пропонованої конструкції, зокрема *S* - подібної робочої поверхні 6 ліфтера 2 є проведені лабораторні кінематичні дослідження руху технологічної породи при обертанні кульового млина.

Для землерийних, землерийно-транспортних і навантажувально-розвантажувальних машин ковшового типу застосування гумових еластомірних матеріалів в робочому обладнанні також може бути ефективно. Так, для одноківшевого екскаватора застосування еластомірів доцільне для усунення негативних ефектів залипання вологим або мерзлим ґрунтом внутрішніх порожнин ковша та як вузол утримання ґрунту або зруйнованої гірської породи в ковші, а також як захист шарнірних з'єднань рукояті і ковша від потрапляння вологих і абразивних сполук на поверхні штоків гідроциліндра повороту ковша. Пропоноване робоче обладнання [14] (рис.5) містить гумо-тканинний елемент у вигляді суцільної стрічки з шириною, що рівна ширині ковша і суцільною стороною жорстко закріплений на рукояті. Інша, вільна від кріплення частина гумо-тканинної стрічки вільно звисає та має вертикальні порізи, що перетворюють нижню частину гумо-тканинної стрічки у ряд більш рухомих і незалежних смуг, які вільно адаптуються до криволінійної внутрішньої поверхні ковша екскаватора або фронтального навантажувача. Ці прості технологічні заходи дозволяють створити еластомірний елемент, що володіє різною еластичністю. Кількість розрізів може бути різною по ширині ковша, а також варійованою величиною є довжина прорізу.





1 – рукоять; 2 – ківш; 3 – гідроциліндр повороту ковша; 4 – еластомірний елемент стрічкового типу; 5, 6 – кріплення еластомірного елемента до рукояті

Рисунок 5 – Робоче обладнання одноківшевого гідравлічного екскаватора з гумо-тканинним елементом [14] (автор Карпушин С.О.)

*Джерело: розроблено авторами*

Пропоноване обладнання працездатне для двох типів обладнання екскаваторів: «пряма лопата» і «зворотня лопата». Набір ґрунту здійснюється шляхом створення зусилля рукояттю та шляхом повертання ковша. При цьому, мінеральне середовище, що починає заповнювати ківш, направляє і одночасно притискає нижню частину гумо-тканинної стрічки до внутрішньої поверхні днища ковша. Нижня частина стрічки, що має форму ряду рухомих і незалежних смуг, легко вкладається в порожнину ковша, та завдяки еластичності гуми, адаптивно приймає форму внутрішньої поверхні ковша. Таким чином, між вологим мінеральним середовищем та внутрішньою металевою криволінійною поверхнею ковша, створюється прошарок з гумотканинної стрічки. Так як, гумо-тканинна стрічка протягом робочого циклу екскаватора не сприйматиме розтягувальних напружень, то її товщина може бути мінімальною. Це забезпечує збереження корисного об'єму ковша.

Верхня суцільна частина гумо-тканинної стрічки після закінчення процесу набору ґрунту в ківш, виконуватиме функцію утримувально-накопичувального вузла для набраного матеріалу, та захисного елементу - перешкоджатиме просипанню вологого абразивного середовища на шарнірні елементи з'єднання ковша з рукояттю та шток гідроциліндра повороту ковша.

Процес повороту поворотної платформи екскаватора в горизонтальній площині, з місця набору ґрунту до місця вивантаження, також буде супроводжуватися ефектами мінімальних втрат на інерційне просипання матеріалу.

Вивантаження набраного в ківш мінерального середовища відбуватиметься швидше і легше, так як між внутрішньою металевою криволінійною поверхнею ковша і шаром з гумотканинної стрічки, що має форму ряду рухомих і незалежних смуг, будь-які зв'язки відсутні. Теоретично можливі адгезійні зв'язки між вологим мінеральним середовищем та еластомірним стрічковим елементом. Адгезійний зв'язок може бути пояснений ефектом «присоски» нормального притискання трьохфазного мінерального середовища до суцільної, гладкої та газонепроникної поверхні гуми. Але з врахуванням консолідованого захоплення мінеральним середовищем гумотканинної стрічки, що має

форму ряду рухомих і незалежних смуг різної довжини, імовірність прилипання мінерального матеріалу вкрай низька. Окрім того, ефект розвантаження основної маси ґрунту буде супроводжуватися інерційною складовою, що створить умови для самоочищення незалежних смуг та створить так званий ефект «струшування».

Підводячи підсумки щодо застосування еластомірного елемента в робочому обладнанні одноківшевого екскаватора можна говорити про ефективність роботи нового робочого органу на трьох основних складових робочого циклу екскаватора з чотирьох (четверта складова робочого циклу - повернення порожнього ковша в забій). Варто відміти, що еластомірний елемент застосовано на одноківшевих екскаваторах вперше, причому еластомірний елемент володіє змінною еластичністю та жорсткістю. Вартісні показники капітальних затрат по даному технічному рішенні - не варті уваги.

Аналогічна конструкція робочого обладнання з еластомірним елементом можлива для фронтального навантажувача.

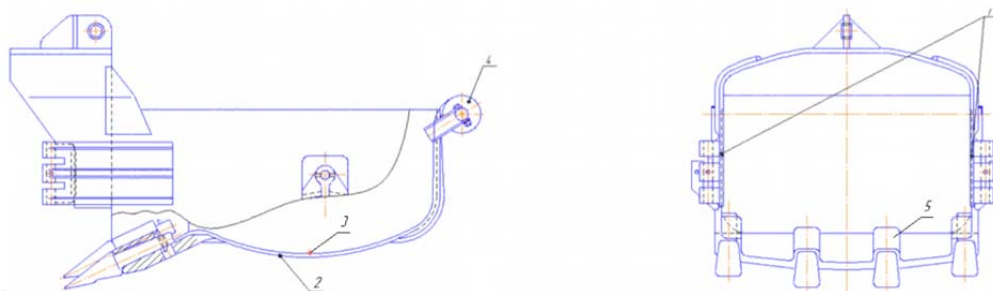
Працездатність та ефективність даного технічного рішення перевірена в лабораторних умовах (рис.6) кафедри БДМБ ЦНТУ.



Рисунок 6 – Фотограма завершальних етапів заповнення ковша (кут  $+30...90^\circ$ ) і вивантаження ковша (кут  $-30...90^\circ$ ) на модельованому ґрунті I категорії з вологістю  $W=16-18\%$ .

*Джерело: розроблено авторами*

Для екскаватора з робочим обладнанням «драглайн», застосування еластоміру у вигляді гумо-тканинної стрічки можливе в комплекті з додатковим металевим барабаном, що встановлений на задній стінці ковша, та приводиться в обертання системою пружин спірального типу, що розташовані в середині барабану (рис.7).



1 – бокові стінки ковша; 2 – днище; 3 – гумо-тканинна стрічка; 4 – барабан;  
5 – ріжуча крайка з зубами

Рисунок 7 – Ківш екскаватора з робочим обладнанням «драглайн»

*Джерело: розроблено авторами*

Ковшовий робочий орган включає: дві бокові традиційні стінки ковша 1, що жорстко з'єднані з криволінійним днищем 2. В задній частині ковша, до бокових стінок 1 посередництвом кронштейнів приєднано барабан 4 з можливістю обертання на підшипниках кочення. В свою чергу, до поверхні барабану 4 приєднано один край листової гумо-тканинної стрічки 3 з шириною, що рівна ширині порожнини ковша. Іншим кінцем гумо-тканинної стрічки 3 закріплена в місці стику ріжучої крайки 5 і днища 2. Барабан 4 в середині містить деяку кількість спіральних пружин. При порожньому ковші пружини деформовані рівно настільки, наскільки це необхідно для того, щоб гумо-тканинна стрічка 3 не провисала. Жорсткість пружин, їх хід та довжина гумо-тканинної стрічки 3 взаємопов'язані. Максимальна жорсткість пружин реалізується за умови заповнення ґрунтом порожнини ковша на номінальну ємність. При цьому, листова гумо-тканинна стрічка 3 приймає форму днища 2 ковша, а барабан 4 прокручується на визначений кут.

Метою застосування еластомірного елемента в ковші «драглайна» є усунення такого недоліку, як залипання вологого ґрунту в порожнині ковша і відповідно не повне його вивантаження. При застосуванні еластомірного елемента в такому вигляді, реалізуються ефекти: гнучкості днища; його рухомості; зміни форми поверхні; ступеня натягу; інерційної складової при зміні навантаження і відповідній зміні жорсткості пружин. Перераховані ефекти сприятимуть усуненню ефекту налипання.

Яскравим представником ковшових робочих органів також є великовантажні автосамоскиди. Для кар'єрних автосамоскидів, що працюють зі скельною породою, проблемними моментами є процес завантаження кузова велико кусковою скельною породою. Процес завантаження супроводжується значними динамічними навантаженнями, що часто викликають пластичні залишкові деформації (пошкодження) металоконструкції кузова. Процес вивантаження супроводжується абразивним руйнуванням робочої поверхні вантажної платформи. Для сучасних багато-осьових автосамоскидів імпортного виробництва та універсального призначення, вантажопідйомністю 30 тон (MAN, Volvo, DAF, Scania, Sinotruk, Shacman, ...), проблемним є вивантаження вологого мінерального матеріалу з кузова, що має в порівнянні з кар'єрними автосамоскидами, значно більшу довжину і висоту бортів.

За умов від'ємних температур зовнішнього повітря, ефект прилипання/приморзання матеріалу до металевого днища посилюється. Футерування внутрішньої частини вантажної платформи цих автосамоскидів еластомірним матеріалом, є також одним з можливих способів вирішення цієї проблеми. Так, на рис. 8 наведено порівняльний процес розвантаження двох аналогічних автосамоскидів, один з яких має гумове футерування внутрішньої поверхні вантажної платформи. Автосамоскиди завантажені ідентичним мінеральним матеріалом.



а) – початкова стадія розвантаження; б) - фінальна стадія розвантаження  
Рисунок 8 – Порівняльний процес розвантаження автосамоскидів, один з яких має футерування кузова еластомірним матеріалом

*Джерело: на основі [15]*

З наведених фото натурного експерименту, можна констатувати факт більш швидкого, рівномірного, інтенсивного та більш безпечного вивантаження матеріалу з кузова автосамоскида, що має еластомірну футеровку днища та частково бічних бортів. Слід відмітити чистоту порожнини вантажної платформи, що футерована еластомірним матеріалом та зробити попереднє припущення щодо захисту металоконструкції кузова від корозії.

Коментуючи наведені на рис. 8 фото, варто все ж таки зауважити, що автосамоскиди стоять занадто близько один до одного, що спричиняє взаємний вплив вивантаженого матеріалу, наявність у правого автосамоскида гнучкого стягування бортів в серединній частині кузова та різницю в конструкції заднього борту.

Особливістю робочого процесу землерийних і землерийно-транспортних будівельних машин з робочими органами відвального типу (бульдозер, автогрейдер) є взаємодія з розроблюваним середовищем при великих значеннях контактних напружень. Доцільність застосування еластомірних матеріалів в класичному обладнанні для розробки ґрунтів з незруйнованою структурою I-III категорій занадто низька і взагалі може мати місце лише в додаткових накопичувальних або транспортувальних пристроях з додатковим приводом.

Для відвальних робочих органів застосування еластомірів конструктивно можливе, економічно доцільне і обґрунтоване для спеціалізованого бульдозерного обладнання, що призначене для снігоочищення, та роботи в якості планувальника в складських умовах з легкими сипучими матеріалами, типу зерно, насіння, корма, добрива, тощо. Замовниками такого снігоприбирального бульдозерного обладнання є фермери України. Причому, слід зауважити, що починаючи з 2014 р. попит на бульдозерне снігоприбиральне обладнання лише збільшується. Це пояснюється необхідністю очищення регіональних доріг селищної громади і доріг фермерського господарства від снігу та потребами щодо догляду: переміщення, перемішування, і т.ін. під час зберігання врожаю в сховищі в осінньо-зимово-весняний період.

Еластомірним матеріалом, що застосовується у так званих снігоприбиральних відвалах, є композитна техпластина ТП-40-1000 [16]. На рис.9 наведено загальний вигляд відвалу універсального призначення для потреб фермерських господарств Кіровоградщини, що виготовлений та встановлений на колісний трактор John Deere 6930 авторами самостійно.



Рисунок 9 – Процес установки універсального для фермерського господарства бульдозерного робочого обладнання доц. Карпушиним С.О. в с. Тарасівка Новгородківського району Кіровоградської області

*Джерело: розроблено авторами*

Призначенням робочого обладнання є снігоприбиральні та планувальні роботи з продукцією сільськогосподарського призначення. Тому в якості матеріалу для ріжучої крайки відвалу прийнято еластомірний композиційний матеріал на основі гуми, а виготовленню відвала передували проектні роботи, що мали на меті розробити конструкцію «плаваючого відвалу» для більш безпечного і швидкого переміщення по твердим і лінійно-протяжним дорожнім покриттям. Варто зауважити, що проектування бульдозерного обладнання для колісних тягачів з великими можливими значеннями деформацій шин передньої вісі і відносно великими швидкостями переміщення є досить складним завданням. До ускладнюючих факторів варто додати конструктивні особливості керованої передньої вісі, наявності противаг, що розташовані над передньою віссю трактора, необхідність в можливості встановлення відвалу під кутом до руху трактора. Усі ці фактори створюють суттєві конструктивні та кінематичні перешкоди для встановлення снігоприбирального бульдозерного обладнання. Зняття противаг знижує зчіпну вагу машини та її тягове зусилля і в кінцевому підсумку прохідність, що неприпустимо в зимових умовах. Тому відомий і популярний серед аграріїв в Україні ТОВ «завод Кобзаренко» м. Київ не виготовлює снігоприбиральні відвали на колісні трактори John Deere сільськогосподарського призначення.

Колективом авторів запропонована власна конструкція універсального робочого обладнання для колісних тракторів John Deere (рис.10), що додатково має демпфуючий пристрій у вигляді пружин та вузол забезпечення вільного вертикального переміщення відвалу на нерівностях дорожнього покриття та при деформації шин передньої вісі колісного трактора у вигляді напрямних прорізів у фасонках бульдозерної рами.

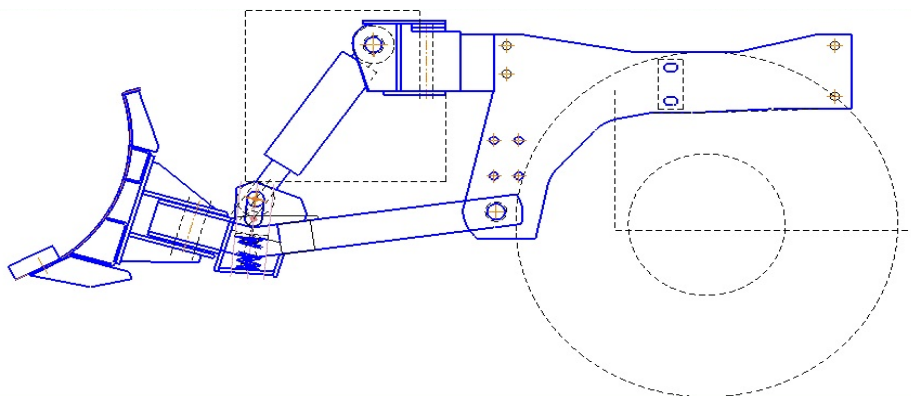


Рисунок 10 – Пропонована конструкція бульдозерного обладнання для колісних тракторів John Deere з пружним демпфером та напрямним компенсатором технологічних коливань (транспортне положення)

*Джерело: розроблено авторами*

Демпфуючий пристрій у вигляді пружин та вузол забезпечення вільного вертикального переміщення відвалу на нерівностях дорожнього покриття у вигляді напрямних прорізів у фасонках бульдозерної рами, запобігають передчасному зносу ножа з еластомірного композиційного матеріалу на основі гуми. На підставі проведених натурних випробувань (рис.11), за проміжок часу з 2015 р. і по теперішній час, встановлено, що ресурс еластомірного елемента відвалу в кліматичних умовах Кіровоградщини складає близько 2 років за умови використання відвалу лише для очищення від снігу і в середньому 1,1 рік при застосуванні для очищення снігу і роботи в складських приміщеннях при переміщенні, перемішуванні збіжжя.



Рисунок 11 – Загальний вигляд колісного трактора John Deere 6930 з пропонованим універсальним бульдозерним робочим обладнанням під час натурних випробувань

*Джерело: розроблено авторами*

**Висновки:** 1. Встановлено, що сучасні еластомірні матеріали володіють широким спектром спеціальних властивостей та мають значні резерви щодо усунення таких суттєвих недоліків робочого обладнання будівельних і дорожніх машин, як: налипання та намерзання мінеральних середовищ до робочих металевих поверхонь, підвищений знос, руйнування металоконструкцій робочих органів в наслідок високих динамічних ударних навантажень.

2. Проведені оглядові дослідження дозволяють стверджувати, що теоретичне і практичне застосування еластомірних гумових елементів в робочих органах будівельних і дорожніх машин, консервативно обмежене.

3. Аналіз фізико-механічних характеристик еластомірних матеріалів показав, що термін придатності еластомірів співставимий з ресурсом будівельних і дорожніх машин

і складає від 7 до 10 років. Проте зношування еластомірних матеріалів, як елементів робочих органів будівельних і дорожніх машин, відбувається значно інтенсивніше, що обумовлюватиме потребу в періодичній їх заміні.

4. Застосування еластомірних матеріалів є доцільним до застосування для усіх видів та типів робочих органів будівельних і дорожніх машин.

5. Встановлено, що застосування еластомірів в робочому обладнанні будівельних і дорожніх машин найбільш ефективно для робочого обладнання ковшового типу.

6. Перспективним подальшим напрямком широкого застосування еластомірів в робочих органах будівельних і дорожніх машин є створення спеціальних композитних гумових сполук та нанотехнології.

## Список літератури

1. Materials science and metalworking / Pavlo Fedirko et al. Kraków, Kamianets-Podilskyi: Copyright by Traicon S.C., 2017. 350p. URL: <https://open.icm.edu.pl/items/e0a21dd7-2612-473d-84ac-a5f4f0612e34> (дата звернення: 07.12.2024).
2. Peter A. Ciullo, Norman Hewitt. The rubber formulary. Norwich New York, U.S.A: NP Noyes Publications, 1999. 725 p. URL: [https://15472507.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAG9\\_vF7AUopMCG6QM.pdf](https://15472507.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAG9_vF7AUopMCG6QM.pdf) (дата звернення: 07.12.2024).
3. Каучук і гума. Наука і технологія / за ред. Дж. Марка, Б. Ерман, Ф. Ейрича. Київ: Інтеллект, 2011. 768 с.
4. Sengupta R., Chakraborty S., Bandyopadhyay S. A shot review on rubber / clay nanocomposit with emphasis on mehanical properties. Polymer Engineering and Science. 2007. V47. №11. P. 1956-1974.
5. Ranimol Stephen, Sabu Thomas. Rubber Nanocomposites. Wiley. 2009. 896 p.
6. Робочі поверхні і футеровки кульових і вібраційних млинів: Монографія. / В.П. Франчук та ін. Кременчук: Щербатих А.В., 2008. 384 с.
7. Балака Максим, Міщук Дмитро, Паламарчук Дмитро. Сучасні уявлення про механізм зносу протекторних гум. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. 2021. №98. С. 30-36. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0302> (дата звернення 07.12.2024).
8. Крепери в роботі. Травень 2017. Будівництво траси Дубки-Левадки. URL: <https://is.gd/v1VU1U> (дата звернення 07.12.2024).
9. Гумова футеровка для млинів. URL: <https://is.gd/O4Pyrz> (дата звернення 07.12.2024).
10. Футеровка барабанного млина: пат. 154731 Україна: B02C 17/22. № u202301451; заявл. 04.04.2023; опубл. 13.12.2023, Бюл. № 50. 4с.
11. Футеровка барабанного млина: пат. 30415 Україна: B02C 17/22. №u201054284; заявл. 12.04.2000; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6. 3с.
12. Футеровка барабанного млина: пат. 59743 Україна: B02C 17/22. № u201013967; заявл. 23.11.2010; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10. 5с.
13. Спосіб виготовлення футерувальної плити барабанного млина: пат. 154801 Україна: B02D 18/02, B02D 27/02. № u202301453; заявл. 04.04.2023; опубл. 20.12.2023, Бюл. № 51. 6с.
14. Робоче обладнання однокішшевого екскаватора: пат. 35362 Україна: E02F 3/28. № u200805563; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. 4с.
15. Самоскиди STAS з покриття в середині кузова і без. URL: <https://is.gd/4AXclh> (дата звернення 07.12.2024).
16. Виробництво та Продаж Шлангів та Рукавів для Промисловості. URL: <https://is.gd/1YjJHr> (дата звернення 07.12.2024).

## References

1. Fedirko Pavlo, Krol Volodymyr, Hutsol Taras, & Kiurchev Serhii. (2017). Materials science and metalworking. Kraków, Kamianets-Podilskyi: Copyright by Traicon S.C. <https://open.icm.edu.pl/items/e0a21dd7-2612-473d-84ac-a5f4f0612e34> [in Ukrainian].
2. Peter A. Ciullo & Norman Hewitt. (1999). The rubber formulary. New York, U.S.A.: NP Noyes Publications. [https://15472507.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAG9\\_vF7AUopMCG6QM.pdf](https://15472507.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAG9_vF7AUopMCG6QM.pdf). [in Ukrainian].
3. Mark Dzh., Erman B & Eirych F. (Eds.). (2011). Kauchuk i huma. Nauka i tekhnolohiia. (Rubber and

- rubber. Science and technology.). Kyiv: Intellect.
4. Sengupta R., & Chakraborty S., & Bandyopadhyay S. A. (2007). Shot review on rubber/clay nanocomposit with emphasis on mehanical properties. *Polymer Engineering and Science*. V.47. 11, 1956-1974.
  5. Ranimol Stephen, & Sabu Thomas. (2009). *Rubber Nanocomposites*. Wiley.
  6. Franchuk V.P., Nastoiaschchi V.A., & Markielov A.Ie. et al. (2008) *Robochi poverkhni i futerovky kulovykh i vibratsiinykh mlyniv*. (Working surfaces and linings of ball and vibratory mills). Kremenchuk: Shcherbatykh A.V. [in Ukrainian].
  7. Balaka Maksym, Mishchuk Dmytro, & Palamarchuk Dmytro. (2021). Suchasni uiavlennia pro mekhanizm znosu protektornykh hum. (Modern ideas about the wear mechanism of tread rubber) *Hirnychi, budivelni, dorozhni i melioratyvni mashyny*. 98 (2021).P. 30-36. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0302>.
  8. Skrepery v roboti. Traven 2017. Budivnytstvo trasy Dubky-Levadky. (Scrapers at work. May 2017. Construction of the Dubki-Levadki highway). <https://is.gd/v1VU1U>.
  9. Humova futerovka dlia mlyniv. (Rubber lining for mills.) <https://is.gd/O4Pyrz>.
  10. Nastoiaschchi V.A., Aulin V.V., Karpushyn S.O. (2023). Futerovka barabannoho mlyna (Drum mill lining) (patent Ukrainy №154731). UKRNOIVI. <https://is.gd/XsgwNC>
  11. Nechyporenko V.A., Makarov H.O., Sheremet V.O. (2020) Futerovka barabannoho mlyna (Drum mill lining) (patent Ukrainy №30415). UKRNOIVI. <https://is.gd/BEuInW>.
  12. Dynda V.I., Markielov A.Ie., Yevenko S.L., Puhach A.M. (2011) Futerovka barabannoho mlyna (Drum mill lining) (patent Ukrainy №59743). UKRNOIVI. <https://is.gd/akh7MV>.
  13. Karpushyn S.O., Nastoiaschchi V.A., Aulin V.V., Pashynskyi M.V., Kuzyk O.V., Panteleienko V.I., Tykhyi A.A. (2023) Sposib vyhotovlennia futerualnoi plyty barabannoho mlyna (Method for manufacturing a drum mill lining plate) (patent Ukrainy №154801). UKRNOIVI. <https://is.gd/dawpTl>.
  14. Karpushyn S.O. (2008) Roboche obladdannia odnokivshevoho ekskavatora (Working equipment of a single-bucket excavator) (patent Ukrainy №35362). UKRNOIVI. <https://is.gd/TqUOu6>.
  15. Samoskydy STAS z pokryttia v seredyni kuzova i bez. (STAS dump trucks with and without interior body coating.) <https://is.gd/4AXcIh>.
  16. Vyrobnystvo ta Prodazh Shlanhiv ta Rukaviv dlia Promyslovosti. (Production and Sale of Hoses and Sleeves for Industry). <https://is.gd/1YjJHr>.

**Serhii Karpushyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vladyslav Nastoiaschchi**, Prof., PhD tech. sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevhen Hozbenko**, master  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*  
**Oleksandr Rusachenko**, post-graduate  
*SHEI Pryazovskyi State Technical University, m. Dnipro, Ukraine*

## **Improvement of the Working Bodies of Construction and Road Machines Using Rubber Elements**

The purpose of the research is to develop technical proposals for improving the working bodies of construction and road machines that interact during their working cycle with a mineral environment (soil, ore, lumpy rock, concrete, asphalt concrete), organic environment at low temperatures (snow, ice, and their mixtures with a mineral environment) using rubber, rubber-fabric, rubber-metal, rubber-concrete and other composite rubber compounds.

The article presents a number of technical solutions that include rubber elements of the working bodies of construction and road machines that are intended for interaction with a mineral natural environment, such as soil, rock, ore, mineral, snow cover, ice formations, agricultural grains. Most characteristics of rubber elastomers have an advantage over classic metal ones in terms of application in the working bodies of construction machines, as they contribute to the elimination of classic disadvantages inherent in these machines (heavy weight, noise, fatigue failure, sticking and freezing of the mineral environment on the elements of the working equipment). These characteristics include: high elasticity, or resiliency; the ability to repeatedly change its shape with a return to its original state; the ability to silently absorb shocks; high wear resistance and corrosion resistance to the action of water and chemically aggressive environment. The article presents a selective and, in the authors' opinion, successful application of rubber and composite elements in the working equipment of a mechanized construction fleet of machines and equipment. The effectiveness of the application of rubber elements in working equipment is analyzed using the example of a wide range of construction machines according to the criteria: wear, sticking, freezing, damping, corrosion resistance, protection of metal elements of structures from plastic deformations.

It has been found that modern elastomeric materials have a wide range of special properties and have significant reserves for eliminating such significant shortcomings of the working equipment of construction and

road machines, as: sticking and freezing of minerals to the working metal surfaces, increased wear, destruction of metal structures of working bodies as a result of high dynamic shock loads. Exploitation of elastomeric materials, taking into account their shelf life (7-10 years), which is comparable to the resource of construction machines, is appropriate for use for all types and classes of working bodies. The use of elastomers in the working equipment of construction and road machines is the most effective for bucket-type working equipment.

**mineral environment, elastomer, rubber element, working body**

*Одержано (Received) 17.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.09.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК628.247.652.784**

**DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.179-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.179-185)**

**С.Л. Хачатурян**, доц., канд. техн. наук

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

*e-mail: [serg130354@gmail.com](mailto:serg130354@gmail.com)*

**С.Г. Ковалевський**, доц., канд. техн. наук

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна*

*e-mail: [2407180@ukr.net](mailto:2407180@ukr.net)*

**О.С. Хачатурян**, канд. екон. наук

*Льотна академія Національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: [elenarice1210@gmail.com](mailto:elenarice1210@gmail.com)*

## Математичне моделювання поведінки ґрунту в процесі проколу

У роботі описується підхід до математичного моделювання поведінки ґрунту в процесі проколу як течії жорстко-пластичного середовища. Рух середовища розглядається в ейлеревих координатах. Робочий орган моделюється абсолютно твердим конусом. Наводяться та обґрунтовуються основні припущення. В підсумку аналітично виводяться всі залежності, що характеризують жорстко-пластичну течію – поля швидкостей, швидкостей деформацій і напружень.

**прокол, жорстко-пластичне середовище, робочий орган, ґрунт, опір ґрунту**

**Постановка проблеми.** При прокладанні інженерних комунікацій часто необхідно перетинати дороги, трамвайні та залізничні колії. У будівництві переходів, наразі, широке застосування знайшли технології безтраншейного прокладання комунікацій, при яких не розривається траншея з руйнуванням дорожнього покриття й порушенням руху транспорту. Одним з найбільш ефективних і широко розповсюджених методів утворення свердловини є метод статичного проколу. Однак, при його використанні виникають великі напруження в ґрунті та його деформація у зоні руху робочого органу, що може викликати як руйнування поверхневого шару, так і близько розташованих підземних інженерних комунікацій. Величина зони деформування залежить від виду ґрунту та його фізико-механічних властивостей. Вочевидь необхідне дослідження процесу ущільнення ґрунту навколо бокових стінок свердловини як жорстко-пластичного середовища.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних методів безтраншейного прокладання інженерних комунікацій показує, що з точки зору мінімуму енергетичних витрат і собівартості виконання робіт найбільш ефективним з них є метод статичного проколу ґрунту [1]. Проте, він дещо обмежений при використанні, так як удавлювання конічно-циліндричного робочого органу пов'язано зі створенням суттєвих зусиль, що викликає значні напруження у масиві ґрунту навколо свердловини, яка формується шляхом його радіального ущільнення [2]. Також встановлено, що опір утворенню свердловини статичним проколом залежить від параметрів робочого органу, наконечник якого, звичайно, має форму конуса [3]. Дослідженнями [4] встановлено, що поширення зони великих напружень у ґрунті навколо свердловини визначається її діаметром й фізико-механічними властивостями ґрунту. Розмір зони пружно-пластичних деформацій навколо свердловини встановлювався експериментальним способом у ході польових досліджень у природних умовах. Дослідження процесу проколу статичним способом і напружень у ґрунті навколо робочого органу у ході утворення свердловини відображені у роботі [5]. У дослідженні [6] встановлено закон зміни щільності ґрунту за товщиною наконечника, визначено тиск ґрунту на підземні комунікації, котрі знаходяться в зоні дії пружно-пластичних деформацій. У той же час недостатньо дослідженими залишаються питання математичного моделювання поведінки ґрунту в процесі проколу та аналітичного визначення залежностей, які характеризують жорстко-пластичний перебіг процесу.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження та математичне моделювання поведінки ґрунту в процесі проколу як течії жорстко-пластичного середовища.

**Виклад основного матеріалу.** Будемо вважати ґрунт, у який вкорінюється робочий інструмент прохідницького ставу, жорстко-пластичним середовищем. Рух середовища будемо розглядати в ейлеревих координатах. Робочий інструмент змодельовано абсолютно твердим конусом.

Приймемо надалі  $v_k$  – векторне поле швидкостей,  $\varepsilon_{kt}$  – тензорне поле швидкостей деформацій,  $\sigma_{kt}$  – тензорне поле напружень,  $\varepsilon_{kt}$  і  $\sigma_{kt}$  – симетричні тензори другого рангу.

Введемо до розгляду середню швидкість деформацій (1), дівіатор швидкостей деформацій (2), середнє напруження (3) та дівіатор напружень (4):

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{kt} \cdot \delta_{kt} = \frac{1}{3} \varepsilon_{kt} = \frac{1}{3} (\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{23}); \quad (1)$$

$$e_{kt} = \varepsilon_{kt} - \delta_{kt} \cdot \varepsilon; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{kt} \cdot \delta_{kt} = \frac{1}{3} \sigma_{kt} = \frac{1}{3} (\sigma_{21} + \sigma_{22} + \sigma_{23}); \quad (3)$$

$$s_{kt} = \sigma_{kt} - \delta_{kt} \cdot \sigma. \quad (4)$$

$\varepsilon$  і  $\sigma$  є інваріантами відповідних тензорів, тобто не залежать від вибору системи координат.

Замість середнього напруження зручно розглядати тиск  $p$  – величину, котра має цілком визначений фізичний зміст:

$$p = -\sigma. \quad (5)$$

Тиск є скалярним полем. Разом з тиском будемо розглядати друге скалярне поле – щільність  $\rho$ . Щільність середовища, котре деформується,  $\rho_0$  передбачається постійною. При деформації щільність можна представити в вигляді

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho, \quad (6)$$

де  $\Delta\rho$  – приріст щільності.

Подальше теоретичне дослідження буде ґрунтуватися на припущенні, що

$$\frac{|\Delta\rho|}{\rho_0} \ll 1. \quad (7)$$

Для ґрунтів нерівність (7) можна вважати тільки дуже грубим першим наближенням. Однак, його доводиться приймати, щоб побудувати математичну модель. В іншому випадку завдання виявляється надзвичайно складним.

Між компонентами тензорів  $e_{km}$  і  $s_{km}$  існує зв'язок – співвідношення Леві-Мізеса [7]:

$$e_{km} = \lambda_{km} \cdot s_{km}, \quad (8)$$

де  $\lambda > 0$  – невизначений множник, враховуючий умову текучості Мізеса [8], котра має вигляд:

$$\frac{1}{2} s_{km} \cdot s_{km} = \tau_y^2, \quad (9)$$

де  $\tau_y$  – межа текучості при зсуві. Для ґрунтів ця величина є функцією відносного ущільнення:

$$\tau_y = \tau_y(\gamma); \quad \gamma = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}; \quad |\gamma| \ll 1. \quad (10)$$

Остання нерівність витікає з нерівності (7).

Від величини  $\gamma$  залежить не тільки  $\tau_y$ , але й тиск. Будемо надалі під тиском  $p$  розуміти надлишковий тиск, тобто тиск, зумовлений дією зусилля робочого органу при проколі.

Якісна залежність  $p(\gamma)$  зображена на рис. 1.

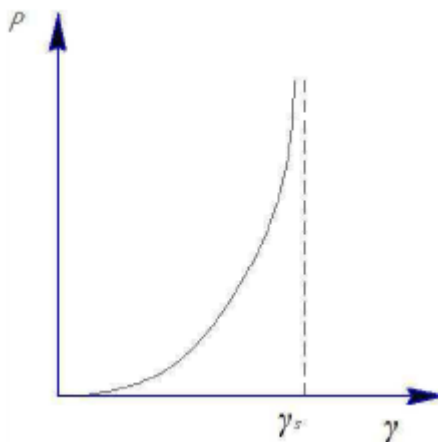


Рисунок 1 – Якісна залежність  $p(\gamma)$

Джерело: розроблено авторами

Фізичний зміст величини  $\gamma_s$  полягає в тому, що при її досягненні вся волога з ґрунту витісняється й при цьому виконується така рівність:

$$\lim_{\gamma \rightarrow \gamma_s} \frac{dp}{d\gamma} = k, \quad (11)$$

де  $k$  – об'ємний модуль абсолютно сухого ґрунту.

Величина  $\gamma_s$  для реальних ґрунтів лежить у інтервалі  $(0,1 \div 0,2)$  [9] і підтверджується в першому наближенні припущенням (7).

Будемо вважати, що опір ґрунту визначається, в основному, опором порівняно вузького шару, котрий прилягає до робочого органу:

$$\gamma = \gamma_s. \quad (12)$$

Отже, величину  $\tau_y$  можна вважати постійною та такою, що дорівнює величині  $\tau_y(\gamma_s)$ . Тому нижче скрізь передбачається, що

$$\tau_y = \text{const}. \quad (13)$$

Відмітимо, що згадані залежності  $p = p(\gamma)$  і  $\tau_y = \tau_y(\gamma)$ , а також величина  $\gamma$  суттєво залежать від швидкості навантаження.

Замість Декартових координат  $x, y, z$  у даному випадку зручно користуватися сферичними координатами  $r, \theta, \varphi$  (рис. 2).

У сферичній системі координат

$$\begin{aligned} v_1 &= v_r; v_2 = v_\theta; v_3 = v_\varphi; \\ \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{rr}; \varepsilon_{22} = \varepsilon_{\theta\theta}; \varepsilon_{33} = \varepsilon_{\varphi\varphi}; \\ \varepsilon_{12} &= \varepsilon_{r\theta}; \varepsilon_{13} = \varepsilon_{r\varphi}; \varepsilon_{23} = \varepsilon_{\theta\varphi}; \\ \sigma_{11} &= \sigma_{rr}; \sigma_{22} = \sigma_{\theta\theta}; \sigma_{33} = \sigma_{\varphi\varphi}; \\ \sigma_{12} &= \sigma_{r\theta}; \sigma_{13} = \sigma_{r\varphi}; \sigma_{23} = \sigma_{\theta\varphi}. \end{aligned} \quad (14)$$

Зв'язок між векторами швидкості та тензором швидкостей деформацій визначається формулами [10]

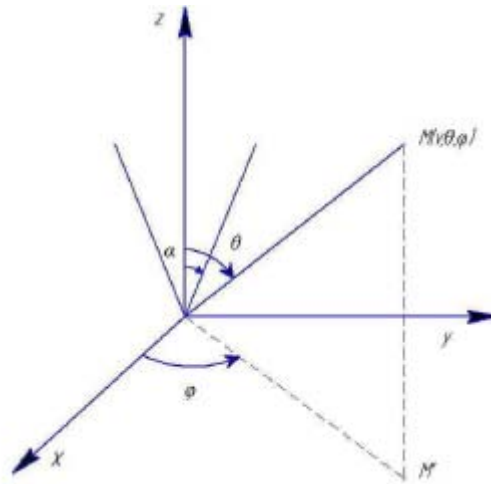


Рисунок 2 – Конус з кутом розвору  $2\alpha$  обтікається жорстко-пластичним середовищем:  
 $r, \theta, \varphi$  – сферичні координати деякої точки  $M$  середовища

Джерело: розроблено авторами

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r}; \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_\theta}{r} \operatorname{ctg} \theta + \frac{v_r}{r}; \\ \varepsilon_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r} \right); \\ \varepsilon_{r\varphi} &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\theta\varphi} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \varphi} - v_{\varphi} \cdot \operatorname{ctg} \theta \right).$$

Поля, котрими характеризується механічна поведінка суцільного середовища, повинні задовольняти записаним нижче диференціальним рівнянням. Перше з них – рівняння нерозривності:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \cdot \rho \cdot v_r) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \cdot v_{\theta} \cdot \sin \theta) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho \cdot v_{\varphi}) = 0. (16)$$

Рівняння руху при нехтуванні силами інерції переходять у рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial v_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} (2 \cdot \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{r\theta} \cdot \operatorname{ctg} \theta) = 0; (17)$$

$$\frac{\partial \sigma_{v\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial v_{\theta\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} [(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\varphi\varphi}) \operatorname{ctg} \theta + 3 \cdot \sigma_{r\theta}] = 0; (18)$$

$$\frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial v_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} (3 \cdot \sigma_{r\varphi} + \sigma_{\theta\varphi} \cdot \operatorname{ctg} \theta) = 0. (19)$$

**Висновки.** Рівняння (17)-(19) разом із співвідношеннями (1)-(4), (8) і (9) дозволяють знайти всі характеристики жорстко-пластичної течії – поля швидкостей, швидкостей деформацій і напружень.

## Список літератури

1. Najafi M. Trenchless technology piping. Installation and inspection / ASCE Press, WEF Press Water Environment Federation Alexandria, Virginia, 2010. 482 p.
2. Hastak M., Gokhale S., Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. New York, 2009. DOI: 10.1115/1.802922.paper30.
3. Хачатурян С.Л. Утворення свердловин пристроєм статичної дії з конічним робочим органом. *Наука та інновації: Матеріали XXXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна проблематика наукових досліджень»*, Чернівці, 15-16 лютого 2016 р. Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2016. С. 4-6.
4. Супонев В.М., Рагулін В.М., Кравець С.В. Визначення максимально допустимого діаметра свердловини за умови заданої глибини проходки методом статичного проколювання ґрунту. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Вип. 101, т. 2. С. 59-66.
5. Супонев В.Н., Олексин В.И., Хачатурян С.Л. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины при ее разработке методом статического прокола *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2016. Вип. 73. С. 202-205. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad\\_2016\\_73\\_40](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2016_73_40).
6. Posmituha, A., Kravets, S., Suponyev, V., & Kulazhenko, Y. Determination of the size of the seal zone and the pressure of the soil on underground communications in the process of deformation of the soil by the wedge tip. *Industrial and Technology Systems*. Published online: (2018, №1(43)). P 11-16. URL: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/146626/146478>.
7. Калюжний О.В. Аналіз інженерним методом процесу обтиску з диференційованим протитиском в конічній матриці / О.В. Калюжний // *Обробка матеріалів тиском*. 2012. №2(31). С. 15-21.
8. Mises R. Mechanik der plastischen Formänderungen von Kristallen. *Zeitschrift für angew. Mat. and Mech.* 1928. B.8. H.3. P. 161 – 185.
9. Черный Г.И. Изменения физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. Киев: Наук. думка, 1979. 132 с.
10. Вайсфельд Н.Д., Фесенко Г.О. Мішані задачі теорії пружності для півнескінченного шару : монографія / Н.Д. Вайсфельд, Г.О. Фесенко. Одеса : Астропринт, 2019. 120 с.

## References

1. Mohammad Najafi (2010) Trenchless technology piping. Installation and inspection / ASCE-press, WEF Press Water Environment Federation Alexandria, Virginia, 482 p. [in English].
2. Hastak, M., Gokhale, S. (2009) Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction. Geological Engineering: *Proceedings of the 1st International Conference*. New York. DOI: 10.1115/1.802922.paper30 [in English].
3. Khachaturian, S.L. (2016). Utvorenniya sverdlorivnykh prystroyem statychnoy diyi z konichnym robochym orhanom [The formation of wells by a device of static action with a conical working body]. Nauka ta innovatsiyi. *Materialy XXXIV Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Suchasna problematyka naukovykh doslidzhen'» – Materials of the XXXIV International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Scientific Research"*. Chernivtsi, 15-16 lyutoho 2016 r. Kyiv: Naukovo-vydavnychyy tsentr «Laboratoriya dumky». P. 4-6 [in Ukrainian].
4. Suponyev V.M., Rahulin V.M., Kravets' S.V. (2023). Vyznachennya maksimal'no dopustymoho diamentra sverdlorivnyy za umovy zadanoyi hlybyny prokhodky metodom statychnoho prokolyuvannya gruntu [Determination of the maximum permissible diameter of the well under the condition of the specified penetration depth by the method of static piercing of the soil]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu – Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*. №101, Volume 2. P. 59-66 [in Ukrainian].
5. Suponev V.N., Oleksin V.I., Khachaturyan S.L. (2016). Issledovaniye protsessy izmeneniya sostoyaniya grunta vokrug gorizonta'noy skvazhiny pri yeye razrabotke metodom staticheskogo prokola [Study of the process of changing the state of the soil around a horizontal well during its development using the static puncture method]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu – Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*. №73. P. 202-205 [in Ukrainian].
6. Posmituha, A., Kravets, S., Suponyev, V., & Kulazhenko, Y. (2018). Determination of the size of the seal zone and the pressure of the soil on underground communications in the process of deformation of the soil by the wedge tip. *Industrial and Technology Systems*. Published online: (№1(43)). P. 11-16. URL: <http://journals.urau.ua/tarp/article/view/146626/146478> [in English].
7. Kalyuzhnyy O.V. (2012). Analiz inzhenernym metodom protsesu obtysku z dyferentsiyovanyim protytskyom v konichniy matrytsi [Analysis by the engineering method of the crimping process with differentiated back pressure in a conical matrix]. *Obrobka materyaliv tyskom – Processing of materials by pressure*. №2(31). P. 15-21 [in Ukrainian].
8. Mises R. (1928). Mechanik der plastischen Formänderungen von Kristallen. *Zeitschrift für angew. Mat. and Mech.* B.8. H.3. P. 161 – 185 [in English].
9. Chernyy G.I. (1979). Izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov pri dinamicheskikh nagruzkakh [Changes in the physical and mechanical properties of soils under dynamic loads]. Kyiv: Nauk. Dumka. 132 p. [in Ukrainian].
10. Vaysfel'd N.D., Fesenko H.O. (2019). Mishani zadachi teoriiy pruzhnosti dlya pivneskinchennoho sharu [Mixed problems of the theory of elasticity for a semi-infinite layer]: monohrafiya. Odesa : Astroprynt. 120 p. [in Ukrainian].

**Serhiy Khachaturyan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Serhiy Kovalevskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

*National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

**Olena Khachaturyan**, PhD Decon. sci.,

*Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

## Mathematical Modeling of Soil Behavior in the Process of Puncture

Modern construction involves the laying of a large number of various engineering communications. It is often necessary to arrange crossings under highways, railway tracks and other ground structures, the destruction of which during open trench development is a very expensive procedure. Recently, the technology of trenchless laying of engineering communications has become widespread. The simplest and quite effective is currently the most common method of static puncture. This method of well formation is characterized by the occurrence of significant stresses in the soil around the working body, which can have a destructive effect on engineering objects located nearby, both in the soil and on the surface. There is an urgent need to study soil behavior during puncture, in particular, using mathematical modeling of the process.

The paper describes an approach to mathematical modeling of soil behavior in the process of puncture as a flow of a rigid-plastic medium. The movement of the medium is considered in Euler coordinates. The working body is modeled by a completely solid cone. The main assumptions are stated and substantiated.

Pressure was considered instead of average stress. The density of the deforming medium was assumed to be constant. Under pressure was understood excess pressure, i.e. pressure caused by the action of the effort of the working body during a puncture. It was believed that soil resistance is determined mainly by the resistance of a relatively narrow layer adjacent to the working body. Instead of Cartesian coordinates, spherical coordinates were used in this case. As a result, all the dependencies characterizing the rigid-plastic flow are analytically deduced – the fields of velocities, deformation velocities and stresses.

**loader, articulated frame, hydraulic drive, steering, dredging, research, mathematical modeling**

*Одержано (Received) 30.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.186-191](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.186-191)

О.О. Окунський, асп., О.П. Цьонь, доц., канд. техн. наук, Г.Б. Цьонь, канд. техн. наук, Р.Я. Лещук, доц., канд. техн. наук., О.А. Юр'єв, асп.

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

*e-mail: tson\_oleg\_@ukr.net*

## Обґрунтування конструктивних параметрів дообрізувача гички з активним ножом

На основі аналізу досліджень технологічного процесу доочищення залишків гички з головок коренеплодів буряків встановлено, що існує необхідність розроблення більш досконалих математичних моделей взаємодії робочого органу для зрізання гички з коренеплодами буряків, які включають аналіз кінематичних та конструктивних параметрів робочих органів гичкозбиральних машин. Впровадження таких моделей дозволить більш точно прогнозувати ефективність роботи різних конструкцій та налаштувань робочих органів, що призведе до підвищення якості очищення коренеплодів, зменшення втрат продукції та зниження витрат на обслуговування обладнання. Побудовано розрахункову схему для визначення конструктивних параметрів дообрізувача гички буряків з активним плоским ножом. Подано аналітичні залежності для узгодження часу переміщення активного ножа у горизонтальній та вертикальній площинах. Запропоновано алгоритм визначення необхідної довжини активного ножа дообрізувача гички, який забезпечує виконання технологічної операції видалення залишків гички відповідно до агротехнічних вимог.

**дообрізувач гички, активний ніж, коренеплоди, гичкозбиральний модуль**

**Постановка проблеми.** Очищення головок буряків від залишків гички під час механізованого збирання є критично важливою операцією, що впливає на загальну якість технологічного процесу. Агротехнічна ефективність бурякозбиральних машин визначається рядом факторів, основними з яких є фізичний стан і тип ґрунту, а також агрофізичні характеристики буряків. Оскільки умови виробництва мають статистичний характер, а агрофізичні параметри буряків варіюються випадковим чином, їхні значення слід враховувати на основі відповідних статистичних показників, таких як математичне очікування, дисперсія, щільність розподілу тощо.

Для обґрунтування параметрів модуля для збирання гички на етапі його конструктивної розробки та проектування доцільно провести теоретичний аналіз можливих варіантів виконання технологічної операції видалення рослинних компонентів з коренеплодів. Це дозволить визначити технологічні параметри роботи модуля для збирання гички, зокрема, оптимальні швидкості руху, кути встановлення і розташування плоских ножів, що забезпечують максимальну ефективність очищення при мінімальних втратах продукції.

Крім того, теоретичний аналіз допоможе передбачити можливі проблеми в роботі обладнання, такі як забруднення чи зношування, і розробити заходи для їх запобігання. Важливо враховувати також вплив на якість обробки, зокрема на збереження цілісності коренеплодів і запобігання їх механічному пошкодженню. Комплексний підхід до проектування забезпечить високу продуктивність і надійність бурякозбиральних машин, що, в свою чергу, позитивно вплине на загальний урожай та економічні результати агрономічних заходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження параметрів дообрізка гички коренеплодів були предметом праць Барановського В., Онищенко В., Паньків М. [1, 2], де висвітлено інформацію про технології та методи збору гички, аналіз конструкцій і теоретично-експериментальні дослідження робочих органів гичкозбиральних модулів. У цих роботах акцентовано увагу на вдосконаленні конструкцій і технологій для підвищення ефективності очищення, зменшення втрат продукції і покращення якості обробки.

У науковій роботі Булгакова В., Адамчука В. [3] розглянуто оптимальні конструктивні та кінематичні параметри нового очисника головок коренеплодів, які забезпечують високу якість очищення від залишків гички на корені. Вони проаналізували різні конфігурації робочих органів та їх взаємодію з коренеплодами, що дозволяє зменшити механічні пошкодження і підвищити ефективність процесу. Дослідження включають оптимізацію швидкостей руху с/г машин, конструкції ножів і механізмів для точного і швидкого видалення гички, що є критично важливим для забезпечення високих стандартів якості при збиранні.

Ці роботи сприяють розвитку сучасних технологій очищення коренеплодів, пропонуючи нові підходи до проектування і налаштування бурякозбирального обладнання для досягнення максимальних результатів.

У зв'язку з цим необхідно розробити та впровадити більш досконалі математичні моделі взаємодії робочого органу для зрізання гички з коренеплодами буряків, які включають дослідження кінематичних та конструктивних параметрів робочих органів гичкозбиральних машин [4, 5].

**Постановка завдання.** Аналізуючи існуючі методи розрахунку додаткового обрізання коренеплодів від залишків гички, можна стверджувати, що вони не в повній мірі враховують особливості цих технологічних процесів. Зокрема, традиційні моделі часто не враховують варіації в агрофізичних властивостях буряків, різноманітність ґрунтових умов та зміни в фізичному стані рослинних компонентів під час збирання.

Метою роботи є розроблення нової розрахункової схеми для визначення конструктивних параметрів активного ножа, яка дозволить більш точно прогнозувати ефективність роботи дообрізувача залишків гички, що призведе до підвищення якості очищення коренеплодів, зменшення втрат продукції та зниження витрат на обслуговування обладнання. Це також сприятиме оптимізації технологічних процесів та підвищенню загальної продуктивності бурякозбиральних машин.

**Виклад основного матеріалу.** Для аналізу конструкції та кінематичних параметрів активного ножа гичкозбиральної машини розглянемо конструктивну схему, зображену на рисунку 1.

Модуль обрізувача гички разом з активним ножом 2 рухається по рядках буряків 1 із прямолінійною швидкістю. При цьому пасивний копір проходить над головою коренеплоду і копіює її контур. Активний ніж 2 рухається одночасно паралельно площині і в зворотньо-поступальному напрямку. Ріжуча кромка активного ножа зрізує головку коренеплоду на заданій висоті зрізу.

Ріжуча кромка активного ножа повинна рухатися в двох напрямках з узгодженими швидкостями, тільки коли вся поверхня головки повністю зрізана, досягається необхідна якість зрізу верхньої частини, що залишилася.

Передбачається, що активний ніж дообрізувача рухається лінійно вздовж рядків з постійною швидкістю. Якщо в горизонтальній площині, коли ріжуча кромка леза рухається вздовж головки коренеплоду або ріже в поздовжньому напрямку, точка  $2_n$ , що належить ріжучій кромці леза, переміщується в бік кінця різання головки

коренеплоду, гарантуючи повне зрізання головки 1 (рис.1) коренеплоду ріжучою кромкою 3 активного леза 2.

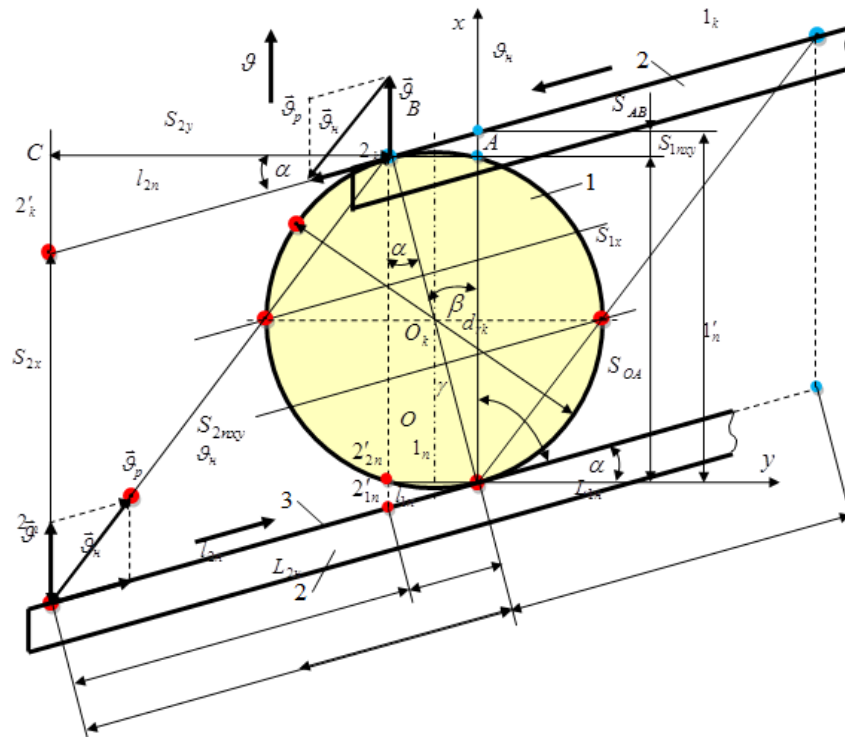


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення параметрів активного ножа

Джерело: розроблено авторами

При цьому час, який витрачається на переміщення ріжучої кромки леза активного ножа від точки  $2_n$  до точки  $2_k$ , тобто час  $t_{r\vartheta_n}$ , який витрачається на переміщення ріжучої кромки леза ножа в горизонтальній площині, був більшим або рівним, ніж час, який затрачається на переміщення гнчкозбирального модуля у горизонтальній площині  $Oxy$ . Аналітична залежність для узгодження часу переміщення активного ножа у горизонтальній та вертикальній площинах набуде вигляду

$$t_{r\vartheta_n} \geq t_{r\vartheta}, \text{ або } \frac{S_{2y}}{\vartheta_n \cos \alpha} \geq \frac{S_{2x}}{\vartheta}, \quad (1)$$

де  $t_{r\vartheta_n}$  – час переміщення точки  $2_n$  в точку  $2_k$  вздовж осі  $Oy$ , с;

$t_{r\vartheta}$  – час зрізання головки коренеплоду активним ножом від точки  $1_n$  до точки  $2_k$  вздовж осі  $Ox$ , с;

$S_{2y}$  – шлях переміщення точки  $2_n$  в точку  $2_k$  вздовж осі  $Oy$ , м;

$S_{2x}$  – шлях переміщення точки  $1_n$  до точки  $2_k$  вздовж осі  $Ox$ , м;

$\vartheta_n$  – швидкість руху ножа, м/с;

$\alpha$  – кут встановлення активного ножа відносно осі  $Oy$ , град.

Встановимо відстань  $S_{2x}$ , яка забезпечує переміщення точки  $1_n$  в  $2_k$  у повздовжньому напрямку відповідно до рис. 1.

$$S_{2x} = S_{1x} = S_{OA} + S_{AB} \quad (2)$$

Відстань  $S_{2x}$ , яка забезпечує виконання технологічного процесу видалення залишків гички вздовж осі  $Ox$  (рис. 1) буде рівна

$$S_{2x} = d_{rk} \cos \alpha + d_{rk} \sin^2 \alpha = d_{rk} (\cos \alpha + \sin^2 \alpha), \quad (3)$$

або

$$S_{2x} = d_{rk} \cos \alpha + l_{1n} \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \cos \alpha (d_{rk} + l_{1n} \sin \alpha) \quad (4)$$

Отже, час  $t_{r,g}$  різання від моменту його початку (точка  $1_n$ ) до закінчення технологічного процесу (точка  $2_k$ ) у поздовжньому напрямку встановлюється за аналітичною залежністю

$$t_{r,g} = \frac{d_{rk} (\cos \alpha + \sin^2 \alpha)}{\frac{dS_x}{dt}}, \text{ або } t_{r,g} = \frac{\cos \alpha (d_{rk} + l_{1n} \sin \alpha)}{\frac{dS_x}{dt}}, \quad (5)$$

Дослідимо величину шляху  $S_{2y}$  переміщення точки  $2_n$  активного ножа в точку  $2_k$  для поперечного напрямку (вздовж осі  $Oy$ ).

Із прямокутного трикутника  $2_k 2'_k C$  (див. рис. 1) визначаємо шлях  $S_{2y}$

$$S_{2x} = l_{2n} \cos \alpha, \quad (6)$$

де  $l_{2n}$  – частина робочої довжини активного ножа, м.

При цьому:

$$l_{2n} = L_{2n} - l_{1n} = L_{2n} - d_{rk} \sin \alpha, \quad (7)$$

де  $L_{2n}$  – робоча довжини активного ножа між крайньою точкою ріжучої кромки леза та точкою початку різання головки коренеплоду, м.

Відповідно до формул (6-7), шлях  $S_{2y}$  буде визначатися виразом

$$S_{2y} = (L_{2n} - d_{rk} \sin \alpha) \cos \alpha. \quad (8)$$

Таким чином, час  $t_{r,g_n}$  переміщення точки  $2_n$  ріжучої кромки леза активного ножа в точку  $2_k$  у поперечному напрямку або вздовж осі  $Oy$  може бути встановлений як

$$t_{r,g_n} = \frac{(L_{2n} - d_{rk} \sin \alpha) \cos \alpha}{\frac{dS_y}{dt}}. \quad (9)$$

Підставивши значення часу  $t_{r,g_n}$  переміщення точки  $2_n$  ріжучої кромки леза активного ножа в точку  $2_k$  у поперечному напрямку та значення часу  $t_{r,g}$  різання головки коренеплоду ріжучою кромкою леза активного ножа від точки початку різання

$l_n$  до точки кінця різання  $2_k$  у поздовжньому напрямку отримаємо

$$\frac{(L_{2n} - d_{rk} \sin \alpha) \cos \alpha}{\frac{dS_y}{dt}} \geq \frac{d_{rk} (\cos \alpha + \sin^2 \alpha)}{\frac{dS_x}{dt}}. \quad (10)$$

Із залежності (10) знаходимо необхідну робочу довжину  $L_{2n}$  активного ножа між крайньою точкою ріжучої кромки леза та точкою початку різання головки коренеплоду за якої забезпечується гарантоване повне зрізування головки коренеплоду, або необхідна якість зрізування.

$$L_{2n} \geq d_{rk} \left[ \cos \alpha \left( \frac{dS_y}{dt} / \frac{dS_x}{dt} \right) + \sin \alpha \right]. \quad (11)$$

Формула (11) може бути використана для встановлення конструктивних параметрів активних ножів (їх робочої довжини) за умови ідеального розміщення вертикальної осі коренеплоду відносно осі рядка.

**Висновки.** 1. Аналіз існуючих методів розрахунку додаткового обрізання коренеплодів від залишків гички вказує на те, що традиційні моделі не повністю враховують специфіку технологічного процесу. Наявні моделі часто ігнорують варіації в агрофізичних властивостях буряків, різноманітність ґрунтових умов та зміни в фізичному стані рослин під час збирання.

2. Розроблена розрахункова схема для визначення конструктивних параметрів активного ножа дообрізувача гички дозволяє оцінити необхідну довжину ножа та узгодження його руху у горизонтальній і вертикальній площинах. Отримані аналітичні залежності допомагають забезпечити точне виконання технологічного процесу видалення залишків гички відповідно до агротехнічних вимог.

3. Досягнення високих стандартів якості в агропромисловому комплексі та забезпечення надійної роботи бурякозбиральних машин можливе через впровадження вдосконалених математичних моделей та оптимізацію конструктивних параметрів робочих органів.

## Список літератури

1. Технологічні аспекти процесів роботи гичкозбиральних модулів: монографія / В. М. Барановський, М. Р. Паньків, Е. Б. Береженко, Б. М. Береженко, В. А. Бойко. Тернопіль: Ред.-вид. відділ ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. 294 с.
2. Методологічні основи розробки гичкозбиральних модулів коренезбиральних машин: монографія / В. Б. Онищенко, В. М. Барановський, Г. Б. Цьонь, В. Р. Паньків, І.М. Сторожук. Київ: Ред.-вид. відділ НУБіП України, 2021. 267 с.
3. Булгаков, В., Адамчук, В., Будзанівський, М., Головач, І., Ігнат'єв, Є. Експериментальне дослідження якості роботи очисника головок коренеплідних культур від залишків гички на корені. *Вісник аграрної науки*, 2023. 101(10). С. 47-54.
4. Цьонь, О. П., Сташків, М. Я., Олексюк, В. П., Цьонь, Г. Б. Дослідження залишкового ресурсу плоского ножа дообрізувача гички активного типу. *Праці Міжнародної науково-технічної конференції "Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування"* 2017. С. 251-255.
5. Рибак Т.І., Цьонь О.П. Огляд гичковиделяючих апаратів бурякозбиральних машин та шляхи їх вдосконалення. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка "Технічний сервіс машин для рослинництва"*, Харків, 2013. Вип. № 134. С. 203 – 207.

## References

1. Baranovskyi, V. M. (Eds). (2022). *Tekhnologichni aspekty protsesiv roboty hychkozbyralnykh moduliv: monohrafiia [Technological aspects of the operation of top-dressing modules: monograph]*. Ternopil: Red.-vyd. viddil TNTU im. I. Puliui. [in Ukrainian].
2. Onyshchenko, V. B. (Eds). (2021). *Metodologichni osnovy rozrobky hychkozbyralnykh moduliv korenezbyralnykh mashyn: monohrafiia [Methodological foundations of developing top-dressing modules for root harvesting machines: monograph]*. Kyiv: Red.-vyd. viddil NUBiP Ukrainy. [in Ukrainian].
3. Bulhakov, V., Adamchuk, V., Budzanivskyi, M., Holovach, I. & Ihnatiev, Ye. (2023). Eksperymentalne doslidzhennia yakosti roboty ochysnyka holovok koreneplidnykh kultur vid zalyshkiv hychky na koreni [Experimental study of the performance quality of root crop head cleaners in removing top residues from roots]. *Visnyk ahrarynoi nauky*, 101(10). P. 47-54 [in Ukrainian].
4. Tson, O. P., Stashkiv, M. Ya., Oleksiuk, V. P. & Tson, H. B. (2017). Doslidzhennia zalyshkovoho resursu ploskoho nozha doobrizuvacha hychky aktyvnoho typu [Study of the residual life of the active-type flat knife in top-dressing trimmers]. Pratsi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Poshkodzhennia materialiv pid chas ekspluatatsii, metody yoho diahnostuvannia i prohnozuvannia". P. 251-255 [in Ukrainian].
5. Rybak, T.I., Tson, O.P. (2013). Ohliad hychkovydaliaiuchykh aparativ buriakozbyralnykh mashyn ta shliakhy yikh vdoskonalennia [Review of top-removal devices in beet harvesting machines and paths for their improvement]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka "Tekhnichniy servis mashyn dlia roslynyntstva", Kharkiv, 2013. № 134. P. 203 – 207 [in Ukrainian].

**Oleksandr Okunskiy**, post-graduate, **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Tson**, PhD tech. sci., **Roman Leshchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Oleksandr Yuriev**, post-graduate  
*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### Justification of the Design Parameters of the Additional Trimmer with an Active Knife

To substantiate the parameters of the top-dressing module during its design and development stage, it is advisable to conduct a theoretical analysis of possible variants for performing the technological operation of removing plant components from root crops. This will allow for the determination of technological parameters for the operation of the top-dressing module, including optimal movement speeds, angles of installation, and positioning of flat knives, ensuring maximum cleaning efficiency with minimal product loss.

Based on the analysis of research into the technological process of additional cleaning of top residues from root crop heads, it has been established that there is a need for more advanced mathematical models of the interaction between the cutting organ and the root crops. These models should incorporate the analysis of kinematic and structural parameters of the top-dressing machine's working organs. Implementing such models will allow for more accurate forecasting of the performance of various designs and settings of working organs, leading to improved cleaning quality of root crops, reduced product losses, and lower maintenance costs. A calculation scheme has been developed to determine the structural parameters of a beet top trimmer with an active flat knife.

Analytical dependencies have been provided to coordinate the movement time of the active knife in both horizontal and vertical planes. An algorithm has been proposed to determine the required length of the active knife for the top-dressing trimmer, which ensures that the technological operation of removing top residues is performed in accordance with agronomic requirements.

**top trimmer, active knife, root crops, top-dressing module**

*Одержано (Received) 07.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 16.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**Б.О. Блащак**, асп., **А.В. Бабій**, проф., д-р техн. наук

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

*e-mail: bogdanblashak@gmail.com*

## Обґрунтування окремих конструктивно-технологічних параметрів картоплепосадочної машини

У роботі запропоновано нову конструктивно-технологічну схему картоплепосадочної машини. Особливістю такої конструкції є те, що тут передбачено виконання смугового фрезерування по осі формованого ряду, а утворена ґрунтова стружка присипає насіння картоплі, яке вкладається на сформоване та ущільнене посадкове ложе. Дві пари загортачів формують спочатку малий гребень свіжим ґрунтом та фінальний великий гребень – ґрунтом з міжрядь. При виконанні дослідження обґрунтовано вибір кінематичного режиму роботи фрезерних барабанів по відношенню до товщини ґрунтової стружки, що вирізається ножами, та зроблено вибір типу загортачів.

**картопля, підготовка ґрунту, смугове фрезерування, кінематичний режим, насіння, загортач, гребень, поступальна швидкість, грудкуватість, окупник**

**Постановка проблеми.** Отримання високого урожаю картоплі залежить від багатьох чинників. Серед найважливіших – це спосіб посадки з належною підготовкою ґрунту, що дає відповідний «старт» рослині, та процес збирання, який дозволяє уникнути пошкодження бульб і втрат урожаю в цілому. Виділені технологічні операції хоча в часі і розведені, але в технологічному плані дуже пов'язані між собою. Переважно всі технології вирощування картоплі вказують на те, що картопля краще розвивається, коли її посадка здійснюється гребневим способом [5, 10], проте, як формується гребень, які прошарки ґрунту його утворюють мало де регламентується. А від цих чинників залежатиме ефективність дихання та живлення рослини. З іншого боку – розвинуті плоди формують у гребнях гнізда, що надалі визначають перетин бульбоносного пласту. Цей чинник є важливим для завантаження робочих органів збиральної машини, зокрема, підкопуючих та сепарувальних робочих органів, а також енергетичних затрат на процес збирання. Тому комплекс машин для вирощування картоплі має бути синхронізованим з метою отримання максимальних урожаїв та мінімальних затрат на процес виробництва картоплі.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Якщо розглядати питання вирощування картоплі у великих професійних господарствах з високим ресурсним забезпеченням, то ці питання є відносно добре розвинутими та відлагодженими. Але статистика вирощування картоплі в Україні вказує на те, що значна частка цього продукту виробляється у невеликих фермерських чи підсобних господарствах, де ресурсне забезпечення потребує певного нарощення [1].

В багатьох працях розглядають процес утворення посадкового ложа для насіння картоплі та її зароблення із формуванням гребеня [7, 8], проте, питання пошарового формування перетину гребеня із використанням профрезерованої смуги вздовж осі рядка практично є нерозвинутими та невисвітленими у літературі.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування окремих конструктивно-технологічних параметрів картоплепосадочної машини, яка використовується у технології вирощування картоплі та призначена для роботи у невеликих господарствах в агрегаті з малопотужними енергозасобами.

**Виклад основного матеріалу.** Якісна підготовка ґрунту при посадці картоплі відіграє важливу роль при реалізації даної технологічної операції [9, 11]. Проблема весняного обробітку важких ґрунтів полягає в тому, що часто спостерігається їх значна грудкуватість. Це пов'язано з тим, що у західному регіоні України у весняний період спостерігається достатня кількість вологи, яка не дозволяє якісно виконати першу культивування ґрунту, а після – опади змінює посушлива спека. Результатом є утворення значної кількості задернелих грудок ґрунту, які важко розбити звичайною передпосівною культивацією з боронуванням. Це призводить до того, що картоплепосадочна машина утворює борозенку для вкладання насіння картоплі у незадовільно підготовлений ґрунт та ним же заробляє насіння, утворюючи гребені. Оскільки період часу після посадки картоплі є посушливим, то така структура ґрунту та утворений ним гребень швидко пересихають та знижують потенціал картоплі до її проростання.

Для вирішення поставленої проблеми була розроблена нова технологічна схема картоплепосадочної машини, рис. 1 [2-4].

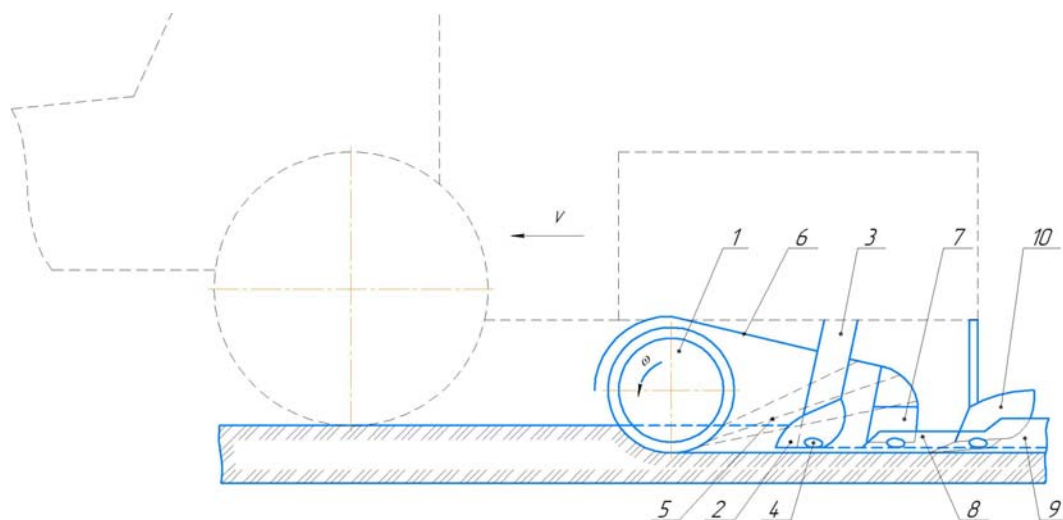


Рисунок 1 – Технологічна схема картоплепосадочної машини

*Джерело: розроблено авторами*

Особливістю такої конструкції картоплесаджалки є те, що кожна її секція обладнана фрезерним барабаном 1 (рис. 1), який приводиться в дію від ВВП енергозасобу та подрібнює крупногрудкуватий ґрунт на глибину посадки насіння, чим дозволяє сошнику 2 утворити ущільнене ложе. Через насіннепровід 3 насіння картоплі 4 разом з мінеральними добривами вкладається на дно утвореної борозенки і спершу присипається ґрунтовою стружкою 5 свіжого ґрунту, яка утворюється за результатом роботи фрезерного барабана 1 та відбивається від його кожуха 6. Крім того, загортачі 7 утворюють з профрезерованої смуги ґрунту малий гребень 8, що повністю прикриває насінину картоплі свіжим та подрібненим ґрунтом. Великий (фінальний) гребень 9, що забезпечує необхідну глибину зароблення насіння, формується лапами-окучниками 10.

В кінцевому результаті отримуємо якісну посадку картоплі у гребенях (рис. 2), де реалізовано наступні ефекти: формується якісне ложе для вкладання насіння за рахунок профрезерованої (розпушеної) смуги ґрунту, що дозволяє сошнику рухатись з

мінімальним опором та ущільнювати днище ложа і тим самим підтягувати вологу до насіння; енергія при фрезеруванні витрачається вдвічі менша у порівнянні з окремою операцією фрезерування при передпосівному обробітку ґрунту за рахунок смугового



Рисунок 2 – Вигляд гребенів після посадки картопляної грядки

*Джерело: розроблено авторами*

обробітку; насіння картоплі прикривається свіжим та оптимальної грудкуватості ґрунтом з профрезерованої смуги.

Якісне фрезерування забезпечується за рахунок правильно підібраного кінематичного режиму  $\lambda$  роботи фрезерного барабана із  $z$  ножами, тобто відношення колової швидкості  $u_n$  точки ножа радіусом  $R$  до поступальної швидкості агрегату (машини)  $\mathcal{Q}_a$ .

Для налагодження фрезерного барабана посадкового агрегату варто скористатися залежностями, що описують зв'язок між поступальною швидкістю агрегату  $\mathcal{Q}_a$ , коловою швидкістю активного робочого органу  $u_n$  та максимальною товщиною ґрунтової стружки  $\delta$ , яка при цьому утворюється.

Таке обґрунтування можна зробити після аналізу траєкторій руху щонайменше двох сусідніх ножів фрезерного барабана. Як відомо, що будь-яка точка ножа фрези описує циклоїду, оскільки фрезерний барабан перебуває у відносному та переносному рухах.

В загальному вигляді рівняння циклоїди можна описати залежностями, що наведені у ряді класичної літератури:

– у вигляді параметричних рівнянь

$$\begin{cases} x = R(\varphi - \sin \varphi), \\ y = R(1 - \cos \varphi); \end{cases} \quad (1)$$

– в декартових координатах

$$x + \sqrt{y(2R - y)} = R \arccos\left(\frac{R - y}{R}\right), \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут повороту барабана.

Як видно, що рівняння (2) є непрактичним до використання у прикладних дослідженнях, тому за основу приймемо рівняння циклоїди в параметричній формі (1).

Перепишемо параметричні рівняння (1), відраховуючи кут  $\varphi$  від горизонтальної осі фрезерного барабана при русі останнього справа на ліво. Тут також врахуємо, що агрегат рухається зі швидкістю  $\mathcal{G}_a$ , а кут  $\varphi = \omega t$  ( $\omega$  – кутова швидкість фрезерного барабана;  $t$  – час.)

Для  $i$ -тої точки ножа фрези матимемо:

$$\begin{cases} x_i = \mathcal{G}_a t + R \cos \omega t, \\ y_i = R \sin \omega t. \end{cases} \quad (3)$$

Тоді подача на ніж буде визначатись переміщенням розглядуваної точки ножа у поступальному русі за час

$$t_z = \frac{2\pi}{\omega z}, \quad (4)$$

тоді, враховуючи співвідношення колової швидкості  $u_n$  до поступальної швидкості агрегату (машини)  $\mathcal{G}_a$  через показник кінематичного режиму роботи  $\lambda$ , отримаємо вираз подачі на ніж при роботі ґрунтообробної фрези

$$S_z = \frac{2\pi R}{\lambda z}. \quad (5)$$

Для вибору оптимально кінематичного режиму роботи фрезерного барабана потрібно керуватися агротехнічними вимогами, що регламентують висоту гребенів, які утворюються на дні борозни, їх значення не повинно перевищувати  $h = 0,2a$ ,  $a$  – глибина фрезерування.

Запишемо вираз кінематичного режиму роботи фрезерного барабана з врахуванням висоти утворених гребенів

$$\lambda = \frac{R \left[ \pi(z+2) - 2z \arcsin \left( 1 - \frac{h}{R} \right) \right]}{2z(2hR - h^2)^{1/2}}. \quad (6)$$

Відповідно до виразу (6) варто вибирати значення  $\lambda$  в залежності від глибини фрезерування при дотриманні умови максимальної висоти гребенів на дні борозни, рис. 3.

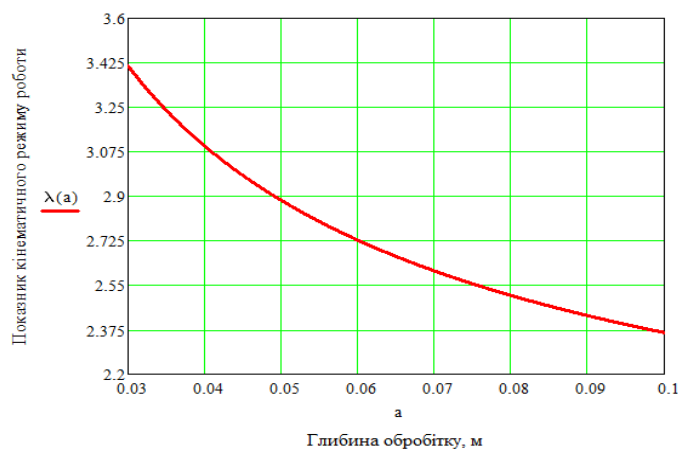


Рисунок 3 – Графічна залежність показника кінематичного режиму роботи фрезерного барабана від глибини обробітку

Джерело: розроблено авторами

Крім того, вибір кінематичного режиму роботи фрезерного барабана картоплекосадочного агрегату має забезпечувати оптимальну грудкуватість профрезерованої смуги, на що було наголошено вище. Визначення подачі на ніж не в повній мірі характеризує величину максимальної товщини стружки. Як показують числові розрахунки, що максимальна товщини ґрунтової стружки є дещо більшою від величини подачі на ніж. Тому є необхідність звести в одну залежність для визначення товщини ґрунтової стружки  $\delta$  кінематичні показники та конструктивні параметри ґрунтової фрези.

Опускаючи проміжні викладки, отримаємо

$$\delta = \frac{4,44D\sqrt{\frac{a}{D} - \frac{2a^2}{D^2}}}{\lambda z}, \quad (7)$$

де  $D$  – діаметр фрезерного барабана.

Для налаштування посадкового агрегату варто навести графічну залежність зміни товщини ґрунтової стружки  $\delta$  від частоти обертання фрезерного барабана  $n_\phi$ , та поступальної швидкості агрегату  $\mathcal{Q}_a$ , рис. 4.

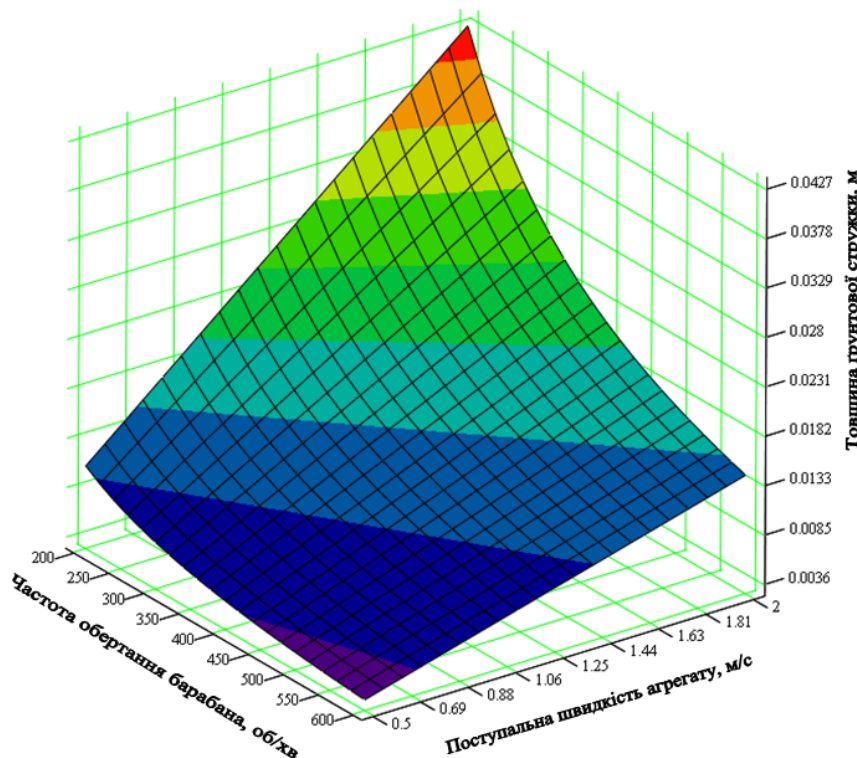


Рисунок 4 – Графічна залежність товщини ґрунтової стружки від кінематичних параметрів агрегату

*Джерело: розроблено авторами*

Графічну залежність (рис. 4) виконано за таких умов: діаметр фрезерного барабана – 0,5 м, кількість ножів – 6, глибина обробітку – 0,06 м, поступальна швидкість агрегату – 0,5...2 м/с, частота обертання фрезерного барабана варіювана в межах – 200...600 об/хв [6].

Наведені графічні залежності (рис. 3 і 4) дозволяють належним чином налаштувати агрегат в частині роботи фрезерного барабана для здійснення ним якісної

підготовки ґрунту – забезпечення оптимальної грудкуватості картопляної грядки. Після цього налаштовують агрегат на задану норму посадки.

Ще одне питання, що виникає при якісному заробленні насіння картоплі у ґрунт, стосується вибору типу загортачів. Найбільш поширеними є пасивні клинові загортачі та напівактивні – дискові.

Розділимо дане питання на два окремих, оскільки в конструкції картоплепосадочної машини передбачені загортачі 7 (рис. 1) та лапи-окучники 10. При формуванні малого гребеня 8 використано пасивні клинові загортачі 7, оскільки їх конструкція є значно простішою у порівнянні з напівактивними дисковими загортачами, хоча останні мають кращу функціональну здатність до формування гребеня при оптимальному діаметрі дисків та радіусі їх кривизни. Але тут слід зауважити, що такі дискові робочі органи, якщо вони малого діаметра, практично втрачають здатність формувати гребень, а конструкція значно ускладнюється; при роботі дискового загортача-окучника у міжрядді на дні борозни утворюється додатковий гребень необробленої ділянки. Ефект виникнення додаткових гребенів – це специфіка роботи дискових ґрунтообробних робочих органів. Висота таких гребенів при роботі дискових борін, лушпильників тощо регламентується на різних технологічних операціях агротехнічними вимогами. При обробі поля на задану глибину цей недолік усувається перекриттям дисків – зміною кута атаки дискового знаряддя чи відстані між дисками. Якщо говорити про формування гребенів при посадці картоплі, то ці регулювання застосувати неможливо, оскільки культурна рослина висаджується у задані міжряддя, які порівняно великі щодо діаметрів дисків, щоб їх можна було використати при роботі з перекриттям. Тому для запропонованої конструкції картоплепосадочної машини було прийняте рішення, що для остаточного формування великого гребеня 9 (рис. 1) доцільно використовувати пасивні лапи-окучники 10. При їх роботі добре будуть прочищені міжряддя картопляної грядки, з якого будуть сформовані великі гребені 9, які наростять вже утворені малі гребені 8.

**Висновки.** На основі запропонованої конструкції картоплепосадочної машини спостерігаються певні ефекти при гребневому способі посадки картоплі. Формується якісне ложе для вкладання насіння за рахунок профрезерованої (розпушеної) смуги ґрунту, вздовж якої рухається сошник з мінімальним опором та своєю нижньою частиною, ущільнюючи днище, утворює додаткову маленьку борозенку, у яку вкладається насіння. За рахунок цього ущільнене днище дозволяє підтягувати вологу з нижніх горизонтів ґрунту, а його форма – додаткова маленька борозенка запобігає відхиленню вкладання бульб від осі рядка. Наступний ефект – це смугове фрезерування, при якому витрачається в 2 рази менша енергія у порівнянні з окремою операцією фрезерування при передпосівному обробітку ґрунту. Крім того, насіння картоплі прикривається свіжим та оптимальної грудкуватості ґрунтом з профрезерованої смуги.

Встановлено, що для фрезерного барабана картоплепосадочної машини діаметром 0,5 м оптимальною є частота обертання близько 265 об/хв, поступальна швидкість агрегату 3,3 км/год (0,92 м/с), тоді максимальна товщина стружки буде становити 15 мм.

Формування гребеня при заробленні насіння передбачає дві стадії – утворення спочатку малого, а потім фінального великого гребенів, де обґрунтовано використовуються пасивні клинові загортачі.

## Список літератури

1. Бабій А.В., Головецький І.В., Гладь Ю.Б. Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин"*, 2023. Вип. 53. С. 227-236.
2. Блащак Б.О., Бабій А.В. Багатофункціональна мінікартоплепосадочна машина. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems»*, 19-21 квітня 2023 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. 155 с.
3. Блащак Б.О., Гамрач В.О. Передумови до обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів картоплесаджалки. *Збірник матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції, 17 – 19 квітня 2024 р. «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем»*. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. С. 12-13.
4. 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. Молодих учених та студентів*, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. С. 94-95.
5. Вирощування картоплі в умовах Східного Лісостепу України: рекомендації. В. О. Муравйов, О. В. Мельник, Н. Г. Духіна, Т. В. Семибратьська, Л. М. Урюпіна. Вінниця : *Твори*, 2020. 48 с.
6. Грунтофреза навісна Bomet (Бомет) 1.4 м. URL: <https://agrotechsvit.com.ua/ua/p1537621625-rochvofreza-navesna-ya-bomet.html>.
7. Грушецький С.М. Інноваційна картопляна техніка – комплексне рішення задач. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвід. наук.-техн. зб.* Під заг. ред. І.М. Черновола. Кіровоград : КНТУ, 2009. Вип. 39. С. 68-81.
8. 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.
9. Думич В. Аналіз конструкцій для садіння картоплі. *Техніка і технології АПК*. 2012. № 12(39). С. 10–13.
10. 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.
11. Томчук В.В. Картоплесаджалка для пророслих бульб. *Механізація сільськогосподарського виробництва. Промислова гідраліка і пневматика*. № 4 (58)'2017. С.54-57.

## References

1. Babii A.V., Holovetskyi I.V., & Hlado Yu.B. (2023). Doslidzhennia kinematychnykh parametriv vibratsiinoho lemesha kartoplekopacha z vykorystanniam kompiuternoi prohramy [Study of kinematic parameters of the vibrating blade of a potato digger using a computer program]. *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichnyi zbirnyk. "Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn"*. Vyp. 53. P. 227-236 [in Ukrainian].
2. Blashchak B.O., & Babii A.V. (2023). Bahatofunktsionalna minikartopleposadochna mashyna [Multifunctional mini potato planter]. *Materialy V Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii «Pidvyshchennia nadiinosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system. Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems»*, 19-21 kvitnia 2023 r. Kropyvnytskyi : TsNTU, 155 p.[in Ukrainian].
3. Blashchak B.O., & Hamrach V.O. (2024). Peredumovy do obgruntuvannia konstruktyvnykh ta kinematychnykh parametriv kartoplesadzhalky [Prerequisites for substantiating the structural and kinematic parameters of the potato planter]. *Zbirnyk materialiv VI Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii, 17 – 19, kvitnia 2024 r. «Pidvyshchennia nadiinosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system»*. Kropyvnytskyi : TsNTU. P. 12-13 [in Ukrainian].
4. Blashchak B.O., & Babii A.V. (2023). Sposib utvorennia borozenky ta zaroblennia nasinnia kartopli pry hrebnevomu sposobi posadky [The method of forming a groove and incorporation potato seeds with the ridge method of planting]. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii : zb. tez dopovidei KhII mizhnar. nauk.-prakt. konf. Molodykh uchenykh ta studentiv, (Ternopil, 6-7 hrudnia 2023) / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Tern. natsion. tekhn. un-t im. I. Puliiua [ta in.]*. Ternopil: FOP Palanytsia V. A., P.94-95 [in Ukrainian].
5. Vyroshchuvannia kartopli v umovakh Skhidnoho Lisostepu Ukrainy: rekomendatsii [Growing potatoes in the conditions of the Eastern Forest Steppe of Ukraine: recommendations]. V. O. Muraviov, .

- V. Melnyk, N. H. Dukhina, T. V. Semybratska, L. M. Uriupina. Vinnytsia: Tvory, 2020. 48 p.
6. Hruntofreza navisna Bomet (Bomet) 1.4 m. URL: <https://agrotechsvit.com.ua/ua/p1537621625-pochvofreza-navesnaya-bomet.html> [in Ukrainian].
  7. Hrushetskyi S.M. (2009) Innovatsiina kartopliana tekhnika – kompleksne rishennia zadach [Innovative potato technology is a complex solution to problems]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : Zahalnodierzhavnyi mizhvid. nauk.-tekhn. zb. Pid zah. red. I.M. Chernovola. Kirovohrad : KNTU. Vyp. 39. P. 68-81* [in Ukrainian].
  8. Didukh V.F., Tarasiuk V.V., & Tarasiuk D.V. (2020). Doslidzhennia sadylnoho aparatu kartopli pasyvnoho typu [Study of the potato planter of the passive type]. *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. st. Lutsk. Vyp. 44. P. 41–50* [in Ukrainian].
  9. Dumych V. (2012). konstruktzii dlia sadinnia kartopli [Analysis of structures for planting potatoes]. *Tekhnika i tekhnologii APK. № 12(39). P. 10–13* [in Ukrainian].
  10. Liashuk V. M., Didukh V. F., Herasymyk-Chernova T. P., & Bartoshyk I. S. (2019). Osoblyvosti formuvannia vrozhaiu kartopli [Features of potato crop formation]. *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. st. Lutsk. Vyp. 42. P. 49–55* [in Ukrainian].
  11. Tomchuk V.V. (2017). Kartoplesadzhalka dlia proroslykh bulb [Potato planter for sprouted tubers]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva. Promyslova hidravlika i pnevmatyka. № 4 (58). P. 54-57* [in Ukrainian].

**Bohdan Blashchak**, post-graduate; **Andrii Babii**, Prof., DSc.

*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### **Justification of Individual Structural and Technological Parameters of the Potato Planting Machine**

The purpose of the study is to substantiate the individual structural and technological parameters of the potato planting machine, which is used in the technology of growing potatoes and is intended for work in small farms in a unit with low-power energy sources.

The work proposes a new structural and technological scheme of the potato planting machine. The peculiarity of this construction is that it provides for strip milling along the axis of the formed row, and the formed soil shavings sprinkle potato seeds, which are placed on the formed and compacted planting place. First two pairs of wrappers form a small ridge with fresh soil and a final large ridge with soil from between the rows. During the execution of the study, the choice of the kinematic mode of operation of the milling drums in relation to the thickness of the ground shavings cut by the knives was substantiated, and the choice of the type of wrappers was made.

On the basis of the proposed construction of the potato planting machine, certain effects are observed in the comb method of planting potatoes. A high-quality seed place is formed due to a milled (loosened) strip of soil, along which the coulter moves with minimal resistance and with its lower part, which compacts the bottom, forms an additional small groove in which the seeds are placed. Due to this, the compacted bottom allows moisture to be drawn up from the lower layers of the soil, and its shape – an additional small groove prevents deviation of the tubers from the axis of the row. The next effect is strip milling, which consumes 2 times less energy compared to a separate milling operation during pre-sowing tillage. In addition, the potato seeds are covered with fresh and optimally lumpy soil from the milled strip. It was established that for the milling drum of the potato planter with a diameter of 0.5 m, the optimal rotation frequency is about 265 rpm, the forward speed of the unit is 3.3 km/h (0.92 m/s), and then the maximum chip thickness will be 15 mm. The formation of the comb during seed production involves two stages – the formation of first small and then the final large combs, where passive wedge wrappers are reasonably used.

**potato, soil preparation, strip milling, kinematic mode, seed, wrapper, ridge, forward speed, lumpiness, hiller**

*Одержано (Received) 16.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 21.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

UDC 621.8:631.356.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.200-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.200-212)

**Andrii Babii**, Prof., DSc, **Ivan Holovetskyi**, post-graduate  
*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*  
*e-mail: avbabiyntu@gmail.com*

## Engineering method of studying the kinematic parameters of the working body of the potato harvesting machine

The work provides an engineering methodology for studying the kinematic parameters of the drive mechanism of the ploughshare of a single-row potato harvesting machine. The development of a new design of the potato harvesting machine led to a special approach to studying its kinematic parameters. The essence of the engineering methodology is that it is based on the graphical-analytical method of plans in the study of kinematic mechanisms. For the physical design of the drive mechanism of the potato harvesting machine, theoretical descriptions were made and plans of velocities and accelerations were built, which allows the researcher to obtain the specified kinematic parameters for any points of the links of this mechanism. The paper obtained a number of values of kinematic parameters that characterize the operation of this mechanism and on the basis of which the technological efficiency of the ploughshare of the potato harvesting machine is analyzed.

**potatoes, potato harvesting machine, kinematic parameters, velocity, acceleration, ploughshare, crank, drive mechanism, working body, engineering methodology**

**Problem statement.** The cost of production of crop products directly depends on the level of mechanization of technological processes. One of the most labor-intensive operations is the harvesting operation in the production of potatoes. This is a particularly acute issue for small farms or farms where there is a lack of equipment [13, 15]. There are many offers of mini potato harvesting machines on the market, but few of them come from Ukrainian manufacturers of such equipment. In addition, most of this equipment is not designed for regional specifics - heavy soils. Therefore, during operation, potato harvesting machines often break down, their technological efficiency decreases, or they are generally unable to perform this technological operation under such conditions [16].

From this follows the need to carry out research work to find new solutions for obtaining optimal designs of potato harvesters [18]. However, the problem is complicated by the fact that we are talking about small, low-energy machines that are operated with tractors of a traction class of 0.6 tons and less. Therefore, decisions made must be well-considered and made on the basis of proven engineering analysis techniques and basic approaches to designing agricultural machinery [2].

**Analysis of recent research and publications.** Many scientists focus on the study of mini potato machines [5-10]. This is especially well developed in those countries that most export such equipment to the world market. However, there is very limited information that covers engineering methods of research, for example, kinematic parameters of the main working bodies of potato diggers. The accuracy of the final result depends on the application and implementation of a particular theory that describes the desired process [3, 4, 14]. The problem is exacerbated if there are new constructive solutions that are different from the typical ones. Then it is difficult for the designer to simulate the work of the proposed design. Therefore, it is worth developing theoretical approaches for analyzing certain parameters of machines in the form of engineering techniques that have the necessary sequence and completeness for the implementation of the study, as well as simple mathematical calculations.

**Statement of the task.** The purpose of the study is to develop an engineering technique for studying the kinematic parameters of the driving mechanism of the ploughshare of a potato harvesting machine as the main working body.

**Presentation of the main material.** According to the development of our own design of the potato harvesting machine (Fig. 1), the biggest interest in the research is the system of ploughshare with its drive mechanism [11]. Energy intensity of machine, the degree of separated particles of the tuberous layer, etc., depends on the efficiency of this working body.

We will build the engineering method of researching the kinematic parameters of the working body based on the principle from the energy input into the system to the interaction of the working body with the environment that creates working resistance.

The ploughshare is driven from the tractor power takeoff shaft, the frequency of which is  $n = 540$  rpm. The selection shaft is connected to the angular conical reducer with a gear ratio  $i = 1,25$ , Fig. 1.



Figure 1 – General appearance of the potato harvesting aggregate

Source: developed by the authors

Based on this, the frequency of the leading link of the drive will be

$$n_1 = \frac{n}{i}. \quad (1)$$

If we go to the angular speed of the driving link (crank), then

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}. \quad (2)$$

Based on considerations of the necessary amplitude of movement of the cutting edge (17 mm), we accept the radius of the crank  $l_1 = l_{AO_1} = 0,0273$  m.

For constructive reasons and the implementation of the physical design of the ploughshare of the potato harvesting machine, the lengths of the links and the distance between their supports are accepted according to the following kinematic scheme of the ploughshare drive, Fig. 2.

For the kinematic analysis of such a mechanism, the simplest is the graphic-analytical method of plans, which gives an idea of the values of velocities and accelerations [17]. This method forms the basis of the proposed engineering methodology.

An important aspect in such a study is to identify the value of the links acting at any point of the ploughshare or other points. For example, in addition to the magnitude of velocities or accelerations, their directions as well. In the future, this will be of crucial

importance for determining the "behavior" of soil particles and tubers on the ploughshare plane, that is, it will determine the possibility of directional movement of such a mass and its separation.

Therefore, using this method, we will establish the necessary kinematic parameters of the studied quantities at characteristic points of the ploughshare plane [12]. In order to obtain a general picture of changes in the velocities and accelerations of the links at certain points of the ploughshare and its drive, now we will take a research step - this is a multiple rotation of the crank is a multiple of 30 and ranges from 0 to 360°. Under these conditions, the ploughshare will perform one complete cycle: forward (working) and reverse (idle) moving.

Now we will move on to determining the kinematic parameters.

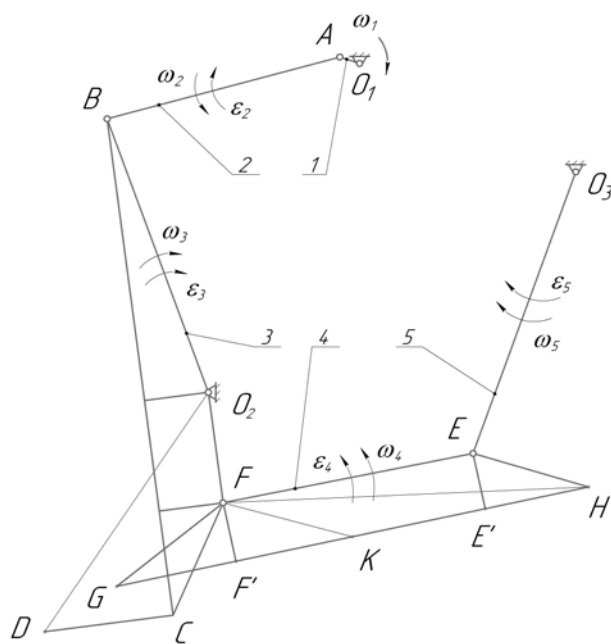


Figure 2 – Kinematic scheme of the ploughshare drive  
Source: developed by the authors

For the initial position of the crank, we assume that it corresponds to the extreme posterior deviation of the ploughshare towards the conveyor, that is, after which the ploughshare blade (working course) will move towards the uncopied tuberous formation. This position is determined by the geometric construction on its kinematic scheme, made to scale. We check the correctness of the positions of the links of such a mechanism on the physical design of the ploughshare drive.

We assume that the tractor power takeoff shaft rotates at a constant angular velocity and  $\omega_1 = \text{const}$ .

Then the linear (circular) speed of the p. A of the crank will be

$$g_A = \omega_1 \cdot l_1. \quad (3)$$

To find the velocities and accelerations for characteristic points belonging to the ploughshare or connecting links of the drive mechanism, vector systems of equations are written, which we will use to solve:

$$\begin{cases} \vec{g}_B = \vec{g}_A + \vec{g}_{BA}; \\ \vec{g}_B = \vec{g}_{O_2} + \vec{g}_{BO_2}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \vec{g}_E = \vec{g}_F + \vec{g}_{EF}; \\ \vec{g}_E = \vec{g}_{O_3} + \vec{g}_{EO_3}. \end{cases} \quad (5)$$

The following notations are used here:  $\vec{g}_B$  – vector of absolute (within the drive mechanism) velocity p. B ;  $\vec{g}_{BA}$  – vector of relative velocity p. B relative to p. A . The

notation for the remaining points is in accordance with the kinematic diagram, Fig. 2.

The main idea of the proposed graphic-analytical method of plans is that unknown velocities can be found by having some of the values of the velocities and for others only their directions. The methodology of the method of plans is known [17] and therefore we will not give its sequence.

Describing the drive mechanism of the ploughshare, we present the dependencies and main results of determining the kinematic parameters of this mechanism. Solutions of systems (4) and (5) are obtained by sequentially calculating the numerical values of the desired velocities of the points and constructing their vectors on the velocity plane in the accepted scale. An example of a velocity plan (Fig. 3) will be given below after describing the procedure for determining all the velocities of the characteristic points of the links.

The angular velocity of the connecting rod  $\omega_2$  (link 2) is found by the value of the relative velocity p. *B* relative to p. *A*, the expression will have the form

$$\omega_2 = \frac{g_{BA}}{l_{BA}}. \quad (6)$$

Similarly, we find the angular velocity of link 3  $\omega_3$ , through the obtained value of the relative velocity p. *B* relative to the support  $O_2$

$$\omega_3 = \frac{g_{BO_2}}{l_{BO_2}}. \quad (7)$$

Next, solving the problem, we see that p. *F* also belongs to link 3, which means that its angular velocity is equal to  $\omega_3$ .

It is known that circular velocities are proportional to the length of the links, so to determine the velocity, the following ratio will be valid  $g_{FO_2} = g_F$

$$g_{FO_2} = \frac{l_{FO_2}}{l_{BO_2}} \cdot g_{BO_2}. \quad (8)$$

The obtained relative velocities of the points allow us to determine the angular velocities of the corresponding links.

The angular velocity  $\omega_4$  of the plane of the ploughshare will be determined by the expression

$$\omega_4 = \frac{g_{EF}}{l_{EF}}. \quad (9)$$

The angular velocity of the rear suspension of the ploughshare (link 5) will be

$$\omega_5 = \frac{g_{EO_3}}{l_{EO_3}}. \quad (10)$$

As it can be seen from Fig. 2, the fourth link *FE* is not in the plane of the base of the ploughshare, but only conditionally connects the points of the hinge joints with the suspensions. The ploughshare design itself is trough-shaped and therefore its actual working plane is lower. In Fig. 2 it is conventionally marked by the line *GH*, which belongs to this plane. Thus, it is necessary to determine the velocity in p. *G* – this is the point of the ploughshare blade, p. *K* – the middle of its base, p. *H* – the point of the rear edge of the ploughshare.

Since the formed figure  $GFEH$  is a solid body described by the characteristic points of the ploughshare, such a figure has the same angular velocity as link 4  $FE$ .

It follows that the relative velocity of p.  $G$  with relative to p.  $F$  will be

$$\mathcal{G}_{GF} = \mathcal{G}_{EF} \frac{l_{GF}}{l_{EF}} = \omega_4 \cdot l_{GF}. \quad (11)$$

In a similar way, we determine the relative velocity of p.  $H$  and p.  $K$

$$\mathcal{G}_{HF} = \mathcal{G}_{EF} \frac{l_{HF}}{l_{EF}} = \omega_4 \cdot l_{HF}, \quad (12)$$

$$\mathcal{G}_{KF} = \mathcal{G}_{EF} \frac{l_{KF}}{l_{EF}} = \omega_4 \cdot l_{KF}. \quad (13)$$

Absolute velocities p.  $H$  and p.  $K$  are determined from the velocity plan, Fig. 3.

And another characteristic point of the ploughshare drive mechanism is the extreme p.  $D$  of the active sidewall. The role of such a link in the ploughshare mechanism is to separate the tuberous layer from the main mass of soil for further facilitated digging.

In the same way we approach the determination of this velocity. Since p.  $D$  belongs to link 3, which has a complex configuration, its angular velocity will be equal to  $\omega_3$ . The expression of the velocity for p.  $D$  will have the form

$$\mathcal{G}_D = \mathcal{G}_{DO_2} = \omega_3 l_{DO_2} = \mathcal{G}_{FO_2} \cdot \frac{l_{DO_2}}{l_{FO_2}}. \quad (14)$$

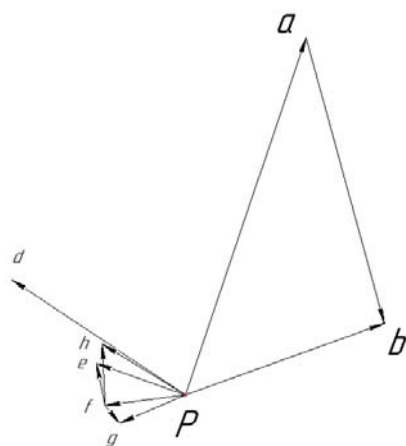


Figure 3 – Velocity plan of the ploughshare drive mechanism ( $\varphi_1 = 30^\circ$ )

Source: developed by the authors

Hence, the method of determining the speeds for all characteristic points of the links of the vibrating ploughshare drive mechanism was described. All key relationships are recorded here, which allow a simple way to establish the value and direction of the velocity of any points of interest to the researcher.

For example, we will show the velocity plan at the crank position  $\varphi_1 = 30^\circ$ , Fig. 3.

Such a velocity plan can be obtained for any position of the drive crank as a leading link and determine the velocity of an arbitrary point belonging to the ploughshare drive mechanism.

According to the results of the study, a number of values of linear and angular velocities were obtained. Fig. 4 shows the graphical dependences of the obtained angular

velocities of the drive mechanism links.

All the necessary linear velocities of the points of the links were also found, which is convenient for implementing the task of studying the processes performed by the ploughshare as a working body.

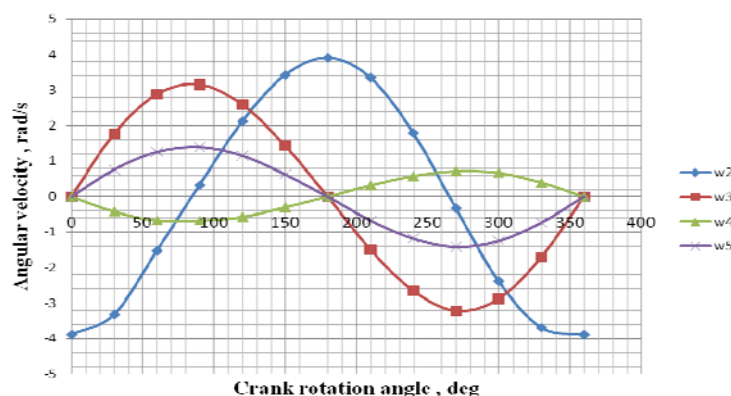


Figure 4 – Graphical dependences of changes in angular velocities of links

Source: developed by the authors

Determining the velocities of the points as a prerequisite for determining accelerations, parameters that we will operate directly to analyze the efficiency of such a mechanism. Let us move on to determining the values and directions of the accelerations of the same characteristic points.

To find the accelerations of points belonging to this mechanism, we first need to compose vector systems of equations, which we will use to solve:

$$\begin{cases} \vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^\tau; \\ \vec{a}_B = \vec{a}_{O_2} + \vec{a}_{BO_2}^n + \vec{a}_{BO_2}^\tau. \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \vec{a}_E = \vec{a}_F + \vec{a}_{EF}^n + \vec{a}_{EF}^\tau; \\ \vec{a}_E = \vec{a}_{O_3} + \vec{a}_{EO_3}^n + \vec{a}_{EO_3}^\tau. \end{cases} \quad (16)$$

Here are denoted:  $\vec{a}_B$  – the vector of absolute (within the drive mechanism) acceleration of p. B,  $\vec{a}_{BA}^n$ ,  $\vec{a}_{BA}^\tau$  – in accordance, the normal and tangential components of the total (modulus) acceleration of p. B in obedience to p. A. The remaining notations are similar and assigned to the corresponding points, Fig. 2.

To solve system (15), it is first necessary to determine the normal components of the total accelerations:

$$a_{BA}^n = \frac{g_{BA}^2}{l_{BA}}, \quad (17)$$

$$a_{BO_2}^n = \frac{g_{BO_2}^2}{l_{BO_2}}. \quad (18)$$

The tangential components of these accelerations will be found from the acceleration plan (Fig. 5), which will also be given after the description of the entire procedure for finding accelerations for characteristic points of the drive mechanism.

Then the total (modulus) accelerations:

$$a_{BA} = \sqrt{(a_{BA}^n)^2 + (a_{BA}^\tau)^2}, \quad (19)$$

$$a_{BO_2} = \sqrt{(a_{BO_2}^n)^2 + (a_{BO_2}^{\tau})^2}. \quad (20)$$

Having the tangential components of the accelerations, we determine the angular accelerations of the links:

– for link 2

$$\varepsilon_2 = \frac{a_{BA}^{\tau}}{l_{BA}}; \quad (21)$$

– for link 3

$$\varepsilon_3 = \frac{a_{BO_2}^{\tau}}{l_{BO_2}}. \quad (22)$$

It is worth noting that  $\varepsilon_1 = 0$ , because  $\omega_1 = \text{const.}$

Now we will solve the second system of vector equations (16).

We determine the acceleration p.  $F$ , which belongs to link 3.

Now we will write an expression for determining the normal component of the acceleration  $a_{FO_2}^n$  through the previously determined velocities of the corresponding points.

$$a_{FO_2}^n = \frac{g_{FO_2}^2}{l_{FO_2}}. \quad (23)$$

Its tangential component will be determined by

$$a_{FO_2}^{\tau} = \varepsilon_3 \cdot l_{FO_2}. \quad (24)$$

Then the total acceleration is p.  $F$

$$a_F = a_{FO_2} = \sqrt{(a_{FO_2}^n)^2 + (a_{FO_2}^{\tau})^2}. \quad (25)$$

Next, it is needed to determine the normal components of the remaining accelerations:

$$a_{EF}^n = \frac{g_{EF}^2}{l_{EF}}, \quad (26)$$

$$a_{EO_3}^n = \frac{g_{EO_3}^2}{l_{EO_3}}. \quad (27)$$

The tangential components of the considered accelerations are determined from the acceleration plan, for instance Fig. 5

The total accelerations will be:

$$a_{EF} = \sqrt{(a_{EF}^n)^2 + (a_{EF}^{\tau})^2}, \quad (28)$$

$$a_{EO_2} = \sqrt{(a_{EO_2}^n)^2 + (a_{EO_2}^{\tau})^2}. \quad (29)$$

Based on the obtained tangential acceleration components, we determine the angular accelerations of links 4 and 5:

$$\varepsilon_4 = \frac{a_{EF}^\tau}{l_{EF}}, \quad (30)$$

$$\varepsilon_5 = \frac{a_{EO_3}^\tau}{l_{EO_3}}. \quad (31)$$

The acceleration of p.  $G$  relative to p.  $F$  we will write in this form

$$\vec{a}_{GF} = \vec{a}_{GF}^n + \vec{a}_{GF}^\tau. \quad (32)$$

where  $a_{GF}^n$  is a normal component of acceleration  $a_{GF}$ ,

$$a_{GF}^n = \frac{g_{GF}^2}{l_{GF}}; \quad (33)$$

$a_{GF}^\tau$  is a tangential component.

We will define this component through the angular acceleration of link 4, because p.  $G$  belongs to it

$$a_{GF}^\tau = \varepsilon_4 \cdot l_{GF}. \quad (34)$$

Then the total acceleration is suitably (32)

$$a_{GF} = \sqrt{(a_{GF}^n)^2 + (a_{GF}^\tau)^2}. \quad (35)$$

Similarly, we find the acceleration  $a_{HF}$ .

$$a_{HF} = \sqrt{(a_{HF}^n)^2 + (a_{HF}^\tau)^2}, \quad (36)$$

where  $a_{HF}^n$  is a normal component of acceleration  $a_{HF}$

$$a_{HF}^n = \frac{g_{HF}^2}{l_{HF}}; \quad (37)$$

$a_{HF}^\tau$  is a tangential component

$$a_{HF}^\tau = \varepsilon_4 \cdot l_{HF}. \quad (38)$$

Another characteristic point of the mechanism under consideration is p.  $D$ , it belongs to the cutting edge of the active side of the ploughshare, its acceleration will be

$$a_{DO_2} = a_D = \sqrt{(a_{DO_2}^n)^2 + (a_{DO_2}^\tau)^2}, \quad (39)$$

where  $a_{DO_2}^n$  is a normal component of acceleration  $a_{DO_2}$ ,

$$a_{DO_2}^n = \frac{g_{DO_2}^2}{l_{DO_2}}. \quad (40)$$

The tangential component of this acceleration is determined through the angular acceleration  $\varepsilon_3$  of link 3

$$a_{DO_2}^t = \varepsilon_3 \cdot l_{DO_2}. \quad (41)$$

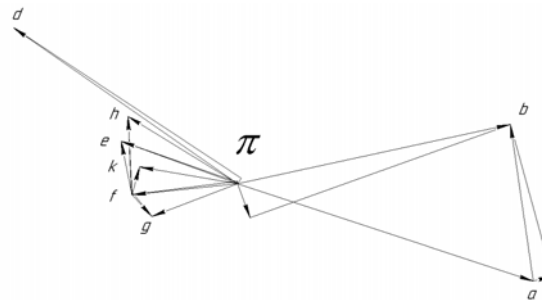


Figure 5 – Plan of accelerations of the ploughshare drive mechanism ( $\varphi_1 = 30^\circ$ )

Source: developed by the authors

Thus, the velocities and accelerations for the characteristic points of the ploughshare drive mechanism were found.

Now an important aspect will be to observe how the determined kinematic parameters will change during the working cycle of the ploughshare. For example, the nature of the change in accelerations will determine the directional movement of the particle along its plane, Fig. 6.

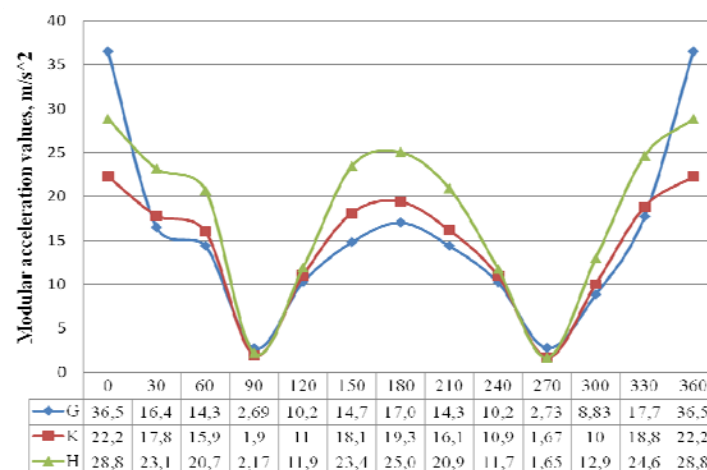


Figure 6 – Change in accelerations at characteristic points of the ploughshare plane

Source: developed by the authors

In addition, it is worth monitoring the change in accelerations that occur in the p.  $G$  belonging to the ploughshare blade, and the p.  $D$  of the active sidewall, the work of which will cause the effect of separating the tuberous layer when digging it, Fig. 7.

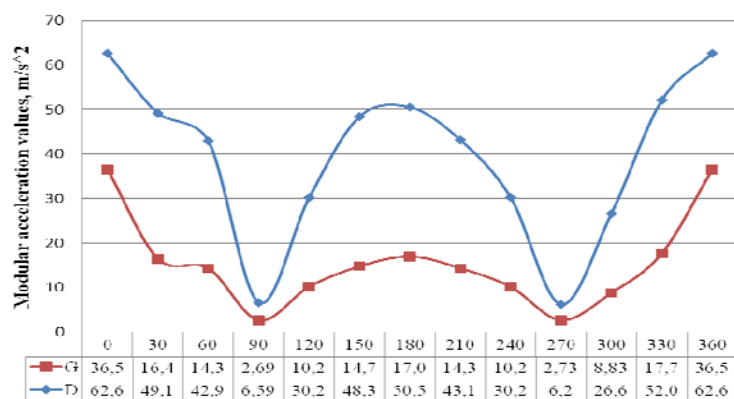


Figure 7 – Acceleration p. D and p. G

Source: developed by the authors

To identify the moments of inertia of the links and determine the tangential components of any points belonging to the links of the ploughshare drive mechanism, it is advisable to indicate the values of the angular accelerations of the links, Fig. 8.

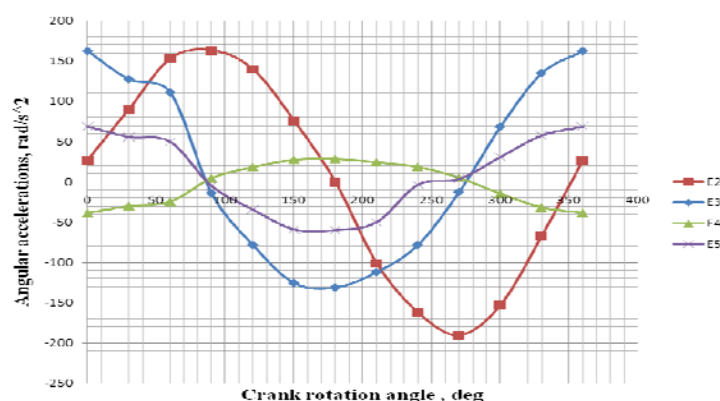


Figure 8 – Angular accelerations of drive mechanism links

Source: developed by the authors

Thus, the presented engineering methodology for studying the kinematic parameters of the ploughshare drive mechanism allows us to describe the patterns of interaction of the links of such a mechanism and characterize the linear, angular velocities and accelerations of any points or links of the mechanism under study. The obtained kinematic parameters have scalar values and directions, which allow the researcher to more fully understand their influence on the process under study.

**Conclusions** The developed engineering methodology for studying the kinematic parameters of the ploughshare drive mechanism is based on the graph analytic method of plans. The advantage of this method is that velocities or accelerations can be determined for any point belonging to the links of the mechanism without using complex analytical descriptions.

Based on the above method, the linear velocities of the characteristic points of the mechanism in all its positions with the crankshaft rotation step were determined  $\varphi_1 = 30^\circ$ .

Here are the ranges of velocity values for characteristic points of the working plane of the ploughshare: p. G –  $\mathcal{G}_G = 0 \dots 0,42$  m/s; p. H –  $\mathcal{G}_H = 0 \dots 0,58$  m/s.

Here are the ranges of velocity values for characteristic points of the working plane of the ploughshare: p. G –  $\mathcal{G}_G = 0 \dots 0,42$  m/s; p. H –  $\mathcal{G}_H = 0 \dots 0,58$  m/s.

Angular velocities of the mechanism links:

link 2 –  $\omega_2 = 0,32...3,9$  rad/s; link 3 –  $\omega_3 = 0...3,21$  rad/s, link 4 –  $\omega_4 = 0...0,72$  rad/s;  
link 5 –  $\omega_5 = 0...1,42$  rad/s.

Acceleration of characteristic points: p. G –  $a_G = 2,69...36,5$  m/s<sup>2</sup>; p. K –  $a_K = 1,9...22,2$  m/s<sup>2</sup>; p. H –  $a_H = 1,65...28,8$  m/s<sup>2</sup>; p. D –  $a_D = 6,2...62,6$  m/s<sup>2</sup>.

Angular accelerations of links:

link 2 –  $\varepsilon_2 = 0...190,5$  rad/s<sup>2</sup>; link 3 –  $\varepsilon_3 = 12,4...162,5$  rad/s<sup>2</sup>; link 4 –  $\varepsilon_4 = 4,84...38,5$  rad/s<sup>2</sup>; link 5 –  $\varepsilon_5 = 3,55...68,8$  rad/s<sup>2</sup>.

The obtained values will be used as the basis for further research into the behavior of a tuberous layer particle on the plane of the ploughshare in order to determine the parameters to ensure its directional movement and separation intensity

## List of References

1. Bulgakov V., Nikolaenko S., Adamchuk V., Z. & Olt J. Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research*. 2018. 16(1). pp. 52-63. DOI: 10.15159/AR.18.037.
2. Fu, Y.; & Wang, C. Experiment and study of the vibration of type 4SW-170 potato digger. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, v.35. P.147-151, 2013. <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2013.01.052>.
3. Hevko R.B., Tkachenko I.G., & Synii S.V., Development of design and investigation of operation processes of small-scale root crop and potato harvesters, *INMATEH Agricultural Engineering*. 49 (2), pp. 53-60, Romania (2016).
4. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., Duganets V.I., Pryshliak, V.L. & Kurylo V.M. Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 59. № 3. pp. 101-110. DOI: 10.35633/INMATEH-59-11.
5. Huali Yu, Xiaoshun Zhao, Yongying Sang & Tao Wu. Parametric Modeling and Moving Simulation of Vibrating Screen and Tubers on Potato Harvester. *Advance Journal of Food Science and Technology* 7(6): 474-478, 2015.
6. Li, J.; Lv, Y.; Sun, Y.; & Lin, Y. Design and experiment of separating and lifting device of potato harvester. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, v.44. P.1-263, 2022. <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2022.12.020>.
7. Lü Jinqing, Tian Zhongen, Wu Jin'e, Yang Ying, Shang Qinqin, Wang Yingbo, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. Vol.31 No.12. Jun. 2015. P. 39-47.
8. Shengshi Xie, Kai L. Lu, Wei G. Deng, Fang Wang, Peng Li & Guangyu Liu. Improved design and experiment of separating sieve for potato digger. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*. v.27, n.12, 2023. P. 966-972. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n12p966-972>.
9. Shengshi Xie, Chunguang Wang, & Weigang Deng. Experiment of a swing separating sieve on a potato digger *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.39, n.4, p.548-554, jul./aug. 2019.
10. Xie, S.; Wang, C.; & Deng, W. Displacement analysis of potato relative to separation sieve and separation sieve performance test. *Journal of Agricultural Science and Technology*, v.21, p.71-81. 2019. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2018.0492>.
11. Бабій А.В. Вібраційний леміш картоплекопача / Бабій, А.В., Головецький, І.В., Гладь, Ю.Б., Андрейків О.Є., Гамрач В.О / Деклараційний патент на корисну модель на 156320 та A01D 21/00 (2024.01). Заявлено 09.01.2024, у 2024 00129, опубліковано 05.06.2024, Бюл. №23.
12. Бабій А.В., Головецький І.В. Визначення конструктивних параметрів елементів машин при нестационарних процесах навантаження. *Матеріали I-ї Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА» присвяченої 80-ти річчю з дня народження професора Ч.В. Пульки. ТНТУ, Тернопіль, 2024. С.149-151.*
13. Бабій А.В., Головецький І.В., Герасимович П.В. Проблеми та перспективи розвитку картоплярства в Україні. *Збірник тез доповідей X-ої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“.* Тернопіль, 2021. ФОП Паляниця

- В.А. Т.1. С. 25-26.
14. Бабій А.В., Головецький І.В., Гладь Ю.Б. Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин"*, 2023. Вип. 53. С. 227-236.
  15. Головецький І.В., Бабій А.В. Конструктивні особливості та ефективність роботи міні картоплекопачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч.ІІ. С. 134-143.
  16. Грушецький С.М. Інноваційна картопляна техніка – комплексне рішення задач. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвід. наук.-техн. зб.* Під заг. ред. І.М. Черновола. Кіровоград : КНТУ, 2009. Вип. 39. С. 68-81.
  17. Кіницький Я.Т. Короткий курс теорії механізмів і машин: Підручник для інж.-тех. спец. вищих закл. України. – 2-е вид., переобл. і скор. Львів: Афіша., 2004. 272 с.
  18. 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.

## References

1. Bulgakov V., Nikolaenko S., Adamchuk V., Z. & Olt J. (2018). Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research*. 16(1). P. 52-63. DOI: 10.15159/AR.18.037.
2. Fu, Y.; & Wang, C. (2013). Experiment and study of the vibration of type 4SW-170 potato digger. *Journal of Agricultural Mechanization Research*. v.35, P. 147-151 <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njvi.2013.01.052>.
3. Hevko R.B., Tkachenko I.G., & Synii S.V., (2016). Development of design and investigation of operation processes of small-scale root crop and potato harvesters, *INMATEH Agricultural Engineering*. 49 (2), P. 53-60. [in Romania].
4. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., Duganets V.I., Pryshliak, V.L. & Kurylo V.M. (2019) Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering*. Vol. 59. № 3. pp. 101-110. DOI: 10.35633/INMATEH-59-11.
5. Huali Yu, Xiaoshun Zhao, Yongying Sang & Tao Wu. (2015). Parametric Modeling and Moving Simulation of Vibrating Screen and Tubers on Potato Harvester. *Advance Journal of Food Science and Technology* 7(6): 474-478.
6. Li, J.; Lv, Y.; Sun, Y.; & Lin, Y. (2022). Design and experiment of separating and lifting device of potato harvester. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, v.44, p.1-263, <https://doi.org/10.13427/j.cnki.njvi.2022.12.020>.
7. Lü Jinqing, Tian Zhongen, Wu Jin'e, Yang Ying, Shang Qinqin, Wang Yingbo, et al. (2015). Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. Vol.31 No.12. Jun. P. 39-47.
8. Shengshi Xie , Kai L. Lu , Wei G. Deng , Fang Wang , Peng Li & Guangyu Liu. (2023). Improved design and experiment of separating sieve for potato digger. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*. v.27, n.12. P. 966-972. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n12p966-972>.
9. Shengshi Xie, Chunguang Wang, & Weigang Deng. Experiment of a swing separating sieve on a potato digger *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.39, n.4. P. 548-554, jul./aug. 2019.
10. Xie, S.; Wang, C.; Deng, W. (2019). Displacement analysis of potato relative to separation sieve and separation sieve performance test. *Journal of Agricultural Science and Technology*, v.21. P.71-81. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2018.0492>.
11. Babii A.V. Vibratsiyni lemish kartoplekopacha [Vibrating ploughshare of a potato harvesting machine]/ Babii, A.V., Holovetskyi, I.V., Hlado, Yu.B., Andreikiv O.Ie., Hamrach V.O / Deklaratsiyni patent na korysnu model ua 156320 u A01D 21/00 (2024.01). Zaiavleno 09.01.2024, u 2024 00129, opublikovano 05.06.2024, Biul. №23 [in Ukrainian].
12. Babii A.V., & Holovetskyi I.V. (2024). Vyznachennia konstruktyvnykh parametriv elementiv mashyn pry nestatsionarnykh protsesakh navantazhennia [Determination of structural parameters of machine elements during non-stationary load processes]. *Materialy I-yi Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii «PRYKLADNA MEKhanika» prysviachenoї 80-ty richchiu z dnia narodzhennia profesora Ch.V. Pulyky. TNTU, Ternopil*. P.149-151 [in Ukrainian].
13. Babii A.V., Holovetskyi I.V., & Herasymovych P.V. (2021). Problemy ta perspektyvy rozvytku

- kartopliarstva v Ukraini [Problems and prospects of the development of potato growing in Ukraine]. *Zbirnyk tez dopovidei Kh-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv „Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologii“*. Ternopil. FOP Palianytsia V.A. T.1. P. 25-26 [in Ukrainian].
14. Babii A.V., Holovetskyi I.V., Hlado & Yu.B. (2023). Doslidzhennia kinematychnykh parametriv vibratsiinoho lemesha kartoplekopacha z vykorystanniam kompiuternoї prohramy [Study of kinematic parameters of the vibrating blade of a potato digger using a computer program]. *Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovy tekhnichnyi zbirnyk. "Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn"*. Vyp. 53. P. 227-236 [in Ukrainian].
  15. Holovetskyi I.V., & Babii A.V. (2023). Konstruktyvni osoblyvosti ta efektyvnist roboty mini kartoplekopachiv [Design features and efficiency of mini potato harvesting machine]. *Tsentrlnoukraiynskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. Vyp. 8(39), ch.II. P. 134-143 [in Ukrainian].
  16. Hrushetskyi S.M. (2009). Innovatsiina kartopliana tekhnika – kompleksne rishennia zadach [Innovative potato technology is a comprehensive solution to problems]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : Zahalnodержavnyi mizhvid. nauk.-tekhn. zb. Pid zah. red. I.M. Chernovola. Kirovohrad : KNTU*. Vyp. 39. P. 68-81 [in Ukrainian].
  17. Kinytskyi Ya.T. (2004) Korotkyi kurs teorii mekhanizmiv i mashyn [A short course in the theory of mechanisms and machines]: Pidruchnyk dlia inzh.-tekhn. spets. vyshchykh zakl. Ukrainy. 2-e vyd., pereobl. i skor. Lviv: Afisha. 272 p [in Ukrainian].
  18. Liashuk V. M., Didukh V. F., Herasymyk-Chernova T. P., & Bartoszyk I. S. (2019). Osoblyvosti formuvannia vrozhaiu kartopli [Features of potato crop formation]. *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. st. Luts'k*. Vyp. 42. P. 49–55 [in Ukrainian].

**А.В. Бабій**, проф., д-р техн. наук, **І.В. Головецький**, асп.

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

### **Інженерна методика дослідження кінематичних параметрів робочого органу картоплезбиральної машини**

Необхідність виконувати дослідницькі роботи з пошуку нових рішень для отримання оптимальних конструкцій картоплезбиральних машин виникла з потребою підвищення рівня забезпеченості збиральною технікою виробників у підсобних чи невеликих фермерських господарствах. Проблема ускладнюється тим, що така машина повинна агрегатуватися з малоенергонасиченими тракторами тягового класу 0,6 т та менше. Тому при обґрунтуванні параметрів запропонованої конструкції картоплекопача рішення мають бути добре зваженими та прийнятими на основі перевірених інженерних методик для аналізу та основних підходів до конструювання сільськогосподарської техніки.

У роботі наведено інженерну методику дослідження кінематичних параметрів приводного механізму лемеша як основного робочого органу однорядної картоплезбиральної машини. Суть інженерної методики полягає в тому, що вона базується на графоаналітичному методі планів при дослідженні кінематичних механізмів. Для фізичної конструкції приводного механізму лемеша картоплекопача зроблено теоретичні описи та побудовано плани швидкостей і прискорень, що дає можливість досліднику отримати вказані кінематичні параметри для будь-яких точок ланок даного механізму. У підсумку отримано ряд значень кінематичних параметрів, що характеризують роботу даного механізму та на основі яких виконується аналіз технологічної ефективності лемеша картоплезбиральної машини.

Таким чином, наведена інженерна методика дослідження кінематичних параметрів механізму приводу лемеша дозволяє описати закономірності взаємодії ланок такого механізму та охарактеризувати лінійні, кутові швидкості та прискорення будь-яких точок чи ланок досліджуваного механізму. Отримані кінематичні параметри мають визначені скалярні значення та напрямки векторів, що дозволяє досліднику більш повно зорієнтуватись про їх вплив на досліджуваний процес. Перевагою такого методу є те, що швидкості чи прискорення можна визначити для будь-якої точки, що належить ланкам механізму, не застосовуючи складних аналітичних описів. На основі наведеної методики були визначені лінійні швидкості характерних точок механізму у всіх його положеннях, кутові швидкості ланок, прискорення точок та кутові прискорення ланок. Отримані значення є основою подальшого дослідження поведінки частинки бульбоносного пласта на площині лемеша з метою визначення параметрів для забезпечення його направленої руху та інтенсивності сепарації.

**картопля, картоплезбиральна машина, кінематичні параметри, швидкість, прискорення, леміш, кривошип, приводний механізм, робочий орган, інженерна методика**

*Одержано (Received) 10.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.213-220](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.213-220)**Л.А. Тарандушка**, проф., д-р техн. наук, **М.П. Рудь**, доц., канд. техн. наук,**О.В. Батраченко**, проф., д-р. техн. наук*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна**e-mail: tarandushkal@ukr.net; hochspannung77@gmail.com;**avbatrachenko1980@gmail.com*

## Підвищення безпеки дорожнього руху шляхом обчислювального аналізу аеродинамічної взаємодії між вантажівкою та мотоциклом

У цій статті ми досліджували вплив вантажівки на мотоцикл за допомогою аеродинамічного аналізу (CFD). Нашою головною метою було покращити безпеку дорожнього руху шляхом оцінки точності та надійності різних моделей турбулентності, які зазвичай використовуються в CFD моделюванні. Ми провели моделювання з використанням трьох різних моделей турбулентності: Spalart-Allmaras (SA), k-epsilon (k-ε) і k-omega (k-ω). Ми проаналізували прогнозовані структури потоку та порівняли їх з експериментальними даними попередніх досліджень. Ми також оцінили аеродинамічний опір, який діє на мотоцикл і вантажівку, і вивчили його вплив на стійкість і керованість мотоцикла. Наші висновки демонструють, що різні моделі турбулентності створюють різні структури потоку та аеродинамічні сили. Зокрема, ми оцінили, які моделі краще передбачають структуру потоку, а які забезпечують найкращі результати для аеродинамічних сил, та провели порівняльний аналіз обчислювальних ресурсів, необхідних для кожної моделі.

**аеродинамічний аналіз, моделі турбулентності, безпека мотоцикла**

**Постановка проблеми.** Безпека дорожнього руху є критичною проблемою в усьому світі, оскільки щороку мільйони людей гинуть або отримують травми в ДТП. Організація Об'єднаних Націй оголосила 2021-2030 роки Глобальним десятиліттям дій з безпеки дорожнього руху з метою скоротити кількість смертей і травм у ДТП на 50% до 2030 року. Щорічно внаслідок дорожньо-транспортних пригод гине понад 1,35 мільйона людей і до 50 мільйонів людей отримують травми. 90% цих жертв припадає на країни, що розвиваються, а ДТП є основною причиною смертності у світі молодих людей віком від 5 до 29 років [1].

За даними звіту "European Road Safety Observatory; Facts and Figures; Motorcyclists and Moped Riders – 2020", у 2018 році в ЄС у ДТП загинуло 3526 мотоциклістів (15,5% від усіх загиблих).

Одним із ключових факторів, що впливає на безпеку дорожнього руху, є взаємодія між різними транспортними засобами, наприклад вантажівкою та мотоциклом. Зокрема, через значні відмінності у розмірі, вазі та результуючій динаміці дослідження руху транспортних засобів, таких як вантажівки та мотоцикли, привернули увагу. Взаємодія вантажівки та мотоцикла на дорозі є важливою проблемою безпеки для мотоциклістів, водіїв вантажівок та інших учасників дорожнього руху.

У цьому дослідженні ми зосередилися на дослідженні аеродинамічного впливу вантажівки на наступний мотоцикл за допомогою моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD). Основною метою нашого дослідження було підвищення безпеки транспортування шляхом вивчення точності та надійності різних моделей турбулентності, які зазвичай використовуються в CFD моделюванні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз аеродинамічної взаємодії за допомогою CFD залишається складним завданням. Тому ідея використання спрощених моделей автомобілів для чисельного аналізу актуальна й сьогодні. Зокрема, тіло Ахмеда зазвичай використовується для перевірки адекватності моделі [2]. Завдяки простоті корпусу результати моделювання можна перевірити в аеродинамічній трубі.

Тіло Ахмеда було використано в [3] для оцінки ефективності різних моделей турбулентності, а саме  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  і SST. Проектування проводилось з метою визначення шляхів зменшення впливу автотранспорту на навколишнє середовище.

Автори [4] досліджували фактори, що впливають на безпеку виконання маневру обгону мотоциклістом. Дослідження проводилося на основі аналізу статистичних даних про ДТП за участю мотоциклістів.

Маневр обгону є одним із найнебезпечніших на дорогах загального користування і привертає увагу багатьох дослідників. У роботі [5] було виконано двовимірне моделювання маневру обгону за участю двох транспортних засобів з боковим вітром і без нього. У [6] CFD-аналіз аеродинамічної взаємодії двох легкових автомобілів, що рухаються назустріч один одному, проводився за допомогою 3-вимірної моделі. Авторі поставили за мету визначити вплив бокового вітру на безпеку автомобільного руху.

Істотним фактором небезпеки є взаємодія великогабаритного та малогабаритного транспорту на дорогах загального користування. У роботі [7] досліджено маневр обгону вантажного автомобіля малолітражним автомобілем за допомогою аеродинамічної труби. У роботі [8] проведено CFD-аналіз двовимірної моделі зустрічного руху легкових і вантажних автомобілів.

Однак, беручи участь у маневрі мотоцикла, необхідно враховувати особливості його аеродинаміки. У роботах [9,10] на реалістичній моделі гоночного мотоцикла було проведено аналіз CFD та встановлено основні характеристики турбулентного повітряного потоку з урахуванням різних факторів.

З аналізу літератури можна зробити висновок, що хоча певні явища, які виникають під час обгону великої вантажівки з мотоциклом, були вивчені, всебічного дослідження впливу цього маневру на безпеку дорожнього руху немає.

**Постановка завдання.** Мета статті полягає у підвищенні безпеки дорожнього руху шляхом обчислювального аналізу аеродинамічної взаємодії між вантажівкою та мотоциклом за допомогою моделювання CFD, зокрема оцінки точності й надійності різних моделей турбулентності та їх впливу на стійкість і керованість мотоцикла.

**Виклад основного матеріалу.** Фундаментальною основою обчислювальної гідродинаміки є чисельне рішення рівняння Нав'є-Стокса. Відразу варто сказати, що у всіх практичних випадках проблем з аеродинамікою автомобіля потік повітря буде турбулентним.

В даний час основним методом моделювання турбулентності є усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (RANS) - розв'язки усереднених за часом рівнянь для відповідно середніх характеристик турбулентної течії. Залежно від кількості та виду додаткових рівнянь ці методи поділяються на:

Алгебраїчні (L-VEL, Y+), які найменш вимогливі до обчислювальних ресурсів, але й найменш точні.

З одним диференціальним рівнянням (модель Спаларта-Аллараса).

Два диференціальних рівняння з граничними функціями (стандартна та реалістична  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ ).

Два диференціальних рівняння без граничних функцій (SST,  $v2f$ ).

**Методологія дослідження.** Для аеродинамічних досліджень створено спрощені CAD-моделі «європейського» (безкапотного) сідельного тягача та шосейного мотоцикла. У цих моделях елементи, які суттєво не впливають на аеродинаміку, були спрощені, щоб скоротити час розрахунку, зберігаючи при цьому реалістичність моделі. Зовнішній вигляд і габаритні розміри моделей представлені на рисунку 1.

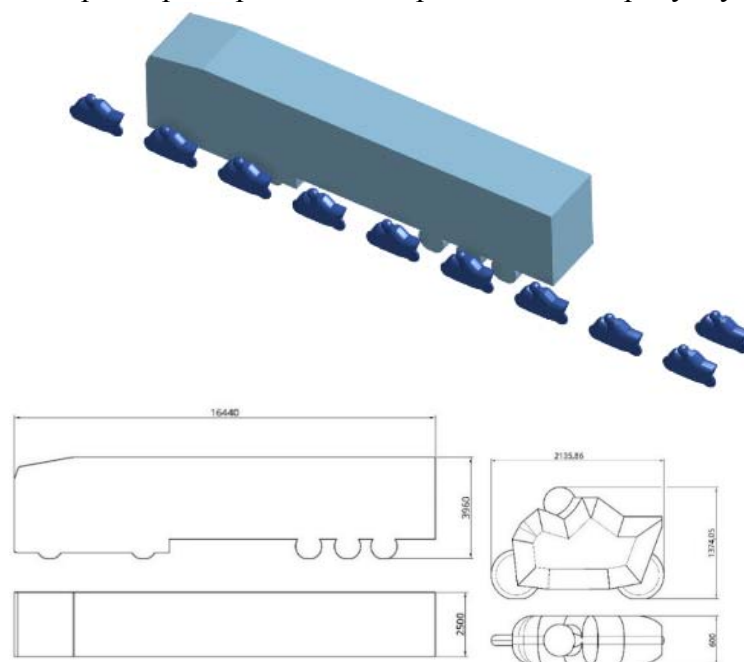


Рисунок2- CAD-модель великої вантажівки та мотоцикла, для яких виконується аналіз.

Показано взаємне розташування транспортних засобів

Джерело: розроблено авторами

Розміри зони для аеродинамічних розрахунків були обрані на основі мінімальної взаємодії між зовнішніми прикордонними зонами та об'єктами всередині. Це дозволяє більш повно вивчити структуру потоку за рухомими вантажівкою та мотоциклом. Для всіх проаналізованих випадків прийнято висоту (8 м), ширину (10 м) і довжину (40 м) розрахункової ділянки (рис. 2).

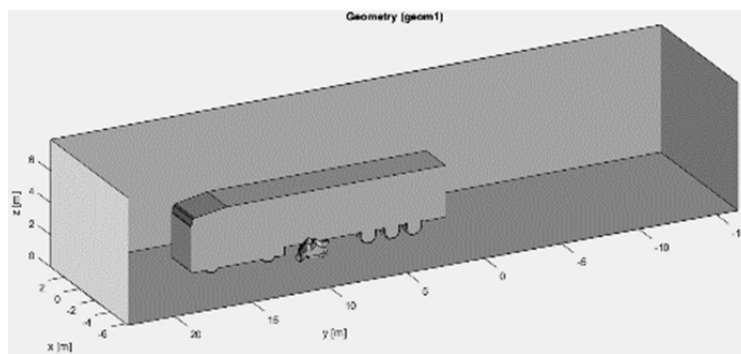


Рисунок3-Обчислювальна область, для якої досліджується аеродинамічна модель

Джерело: розроблено авторами

При побудові розрахункової сітки важливо враховувати зони з підвищеною швидкістю потоку і градієнтами тиску повітря, особливо біля стінок, де формується турбулентний потік. Тому розмір комірок у напрямку до нормальної стінки повинен бути значно меншим, ніж у тангенціальному напрямку. Функції потоку в зонах переднього краю кабіни вантажівки та безпосередньо в сліді вантажівки також вимагають більш точної сітки. Навпаки, зона на відстані позаду автомобіля потребує грубої сітки, оскільки її вплив на взаємодію вантажівки та мотоцикла мінімальний. Слід зазначити, що оптимізація структури розрахункової сітки скорочує час розрахунку, але підвищення точності вимагає більш щільних сіток. Було обрано три варіанти сітки, з найменшою 150696 елементів, проміжною з 305067 елементів і найбільшою з 547535 елементів. Однак вища щільність сітки може погіршити збіжність і вимагати більше обчислювальних ресурсів.

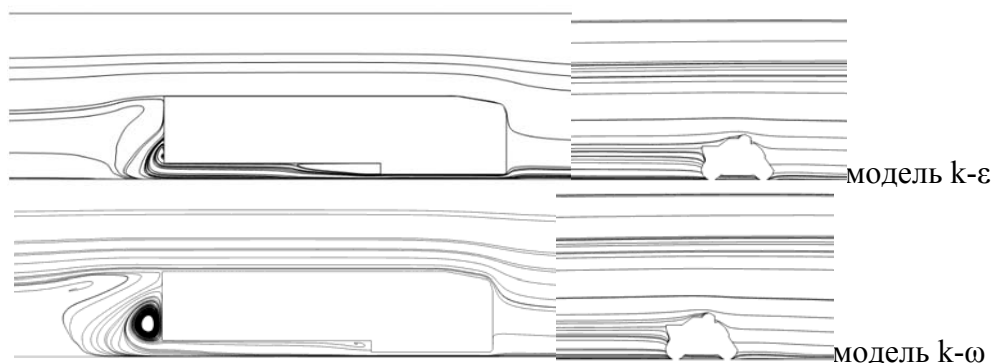
Для моделювання суцільних стін транспортних засобів і дорожнього покриття використовується стандартна гранична умова відсутності ковзання. Нековзаюча стінка - це стінка, в якій швидкість рідини відносно швидкості стінки дорівнює нулю. Для нерухомої стіни це означає, що  $u=0$ .

Для бічної та верхньої стінок домену використовується параметр ковзання, який передбачає умову відсутності проникнення речовини крізь стінку. Тобто нормальна складова вектора швидкості  $u \cdot n = 0$ . Неявно передбачається, що на стінці ковзання немає в'язких ефектів і, отже, не розвивається прикордонний шар. З точки зору моделювання, це може бути розумним наближенням, якщо основним ефектом стіни є запобігання виходу речовини з області. Це не відповідає реальним умовам, але враховуючи достатню відстань між стінками транспортного засобу та доменними стінками, можна використовувати без суттєвої втрати точності моделі.

Дві інші умови стосуються входу і виходу потоку повітря з домену. Швидкість повітряного потоку задається на вхідній межі, оскільки врахування нестационарної турбулентної задачі тривимірного повітряного потоку потребує значної кількості розрахунків, тому для нашої задачі приймаємо однакову швидкість повітря на стаціонарна геометрія моделі. Швидкості вантажівки та мотоцикла відносно поверхні дороги зазвичай набагато більші за різницю їхніх швидкостей, тому для нашої задачі ми беремо середню швидкість 30 м/с (108 км/год). На виході з моделі припустимо граничну умову постійного атмосферного тиску.

**Результати моделювання.** Ми змоделивали процес обгону вантажівки мотоциклом, використовуючи різні моделі турбулентності: Spalart-Allmaras (SA),  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  на трьох щільностях сітки.

Ми проаналізували прогнозовані структури течії та порівняли їх з отриманими для кожної з використаних моделей турбулентності (рис. 3). Як видно з рисунка, структура потоку для мотоцикла дуже мало залежить від моделі турбулентності, що використовується. Однак для вантажівки існує значна турбулентність у кільватері, поява якої залежить від моделі.



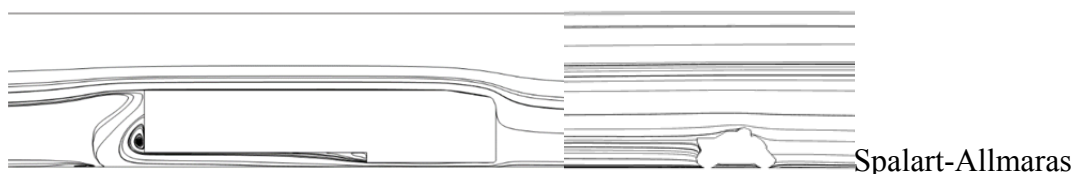


Рисунок 3 - Лінії струму в площині симетрії вантажного автомобіля і мотоцикла

Джерело: розроблено авторами

Ми також оцінили аеродинамічні сили, що діють на мотоцикл, і вивчили їхній вплив на стійкість і керуваність мотоцикла. У таблиці 1 наведені розрахункові коефіцієнти аеродинамічного опору автомобілів, отримані на різних моделях.

Таблиця 1- Розрахований коефіцієнт опору для різних моделей турбулентності.

| коефіцієнт лобового опору | Spalart-Allmaras | модель k- $\omega$ | модель k- $\epsilon$ |
|---------------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| вантажівка                | 0,7725           | 0,7814             | 0,7797               |
| мотоцикл                  | 0,2547           | 0,3981             | 0,2040               |

Джерело: розроблено авторами

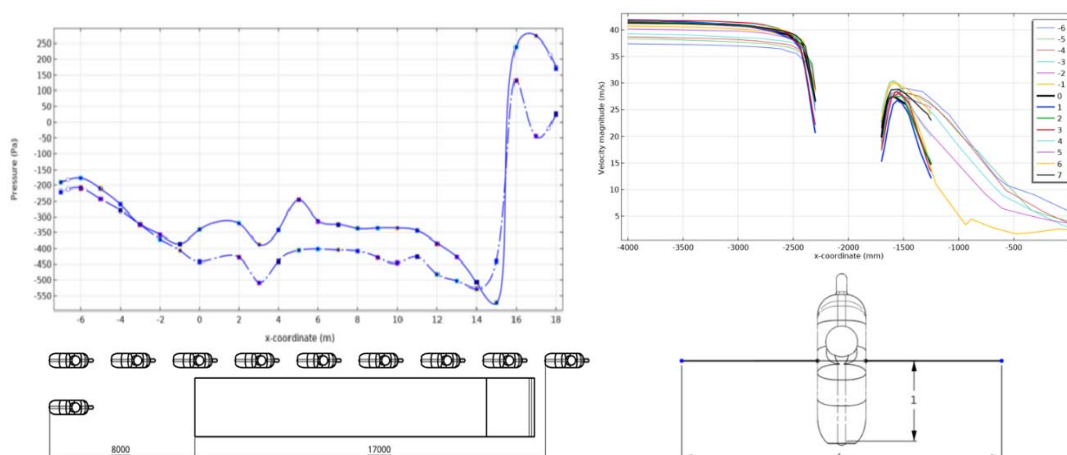
Ми також провели порівняльний аналіз обчислювальних ресурсів, необхідних для кожної моделі, і використання сіток різної щільності, показаних у попередньому розділі. Розрахунковий час наведено для однієї позиції мотоцикла.

Таблиця 2- Розрахунковий час моделей турбулентності для різних сіток.

| коефіцієнт лобового опору | Spalart-Allmaras | модель $\omega$ | модель k- $\epsilon$ |
|---------------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| Сітка 1                   | 8 хв 52 сек      | 6 хв 2 сек      | 5 хв 43 сек          |
| Сітка 2                   | 23 хв 17 сек     | 14 хв 4 сек     | 11 хв 34 сек         |
| Сітка 3                   | 41 хв 3 сек      | 33 хв 19 сек    | 25 хв 5 сек          |

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 4 показано зміну тиску повітря на мотоциклі під час маневру обгону (k- $\epsilon$  модель), а також розподіл падіння тиску в поперечній проекції на мотоцикл.

Рисунок 4 - Зміна тиску повітря на мотоциклі під час маневру обгону ( модель k- $\epsilon$  ).

Джерело: розроблено авторами

Згідно з розрахунком видно, що найбільш небезпечною є зона навпроти переднього краю кабіни вантажівки. На рисунку 5 показано розрахунок зміни тиску в залежності від відстані між мотоциклом і вантажівкою (модель k- $\epsilon$ ) у цій зоні.

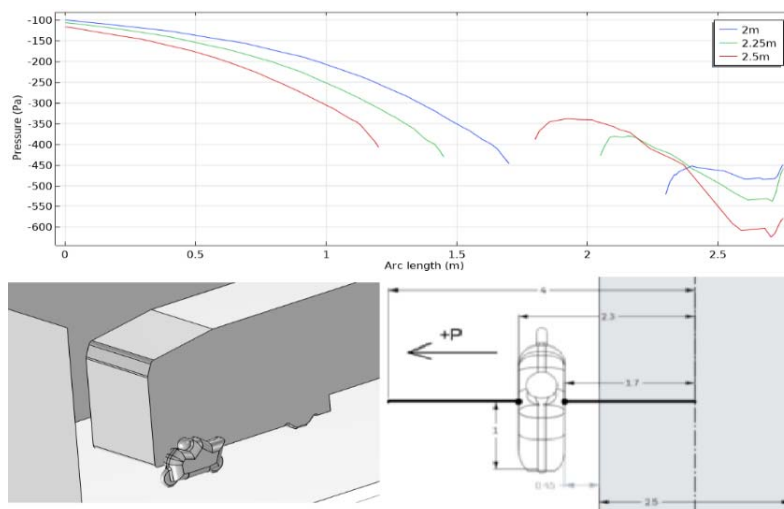


Рисунок 5 - Вплив відстані між мотоциклом і вантажівкою (k- $\epsilon$  модель)

*Джерело: розроблено авторами*

У результаті розрахунку аеродинаміки процесу обгону вантажного автомобіля мотоциклом отримані дані для трьох моделей турбулентності можуть бути використані як для визначення оптимальної розрахункової моделі, так і для розробки рекомендацій щодо підвищення безпеки руху транспортних засобів.

Найбільше часу займає модель Spalart-Allmaras. Інші моделі займають приблизно такий же час розрахунку.

Порівняння отриманого коефіцієнта аеродинамічного опору дозволяє зробити висновок, що для вантажного автомобіля результат використання різних моделей турбулентності істотно не впливає (різниця становить близько 1%). Водночас для мотоцикла відхилення значно більші (майже вдвічі більше, ніж для моделей k- $\omega$  та k- $\epsilon$ ). Можна припустити, що це викликано рухом мотоцикла в турбулентному сліді вантажівки. Як видно з рисунку 5, зовнішній вигляд турбулентного сліду для різних моделей має істотні відмінності.

З точки зору відповідності отриманих розрахункових даних літературним джерелам варто зазначити, що форма турбулентної течії для вантажівки та мотоцикла, описана в роботах [7-10], найкраще корелює з моделлю k- $\omega$ . Однак необхідні додаткові експериментальні дослідження для більш доказового висновку про адекватність моделей.

Слід зазначити обмеження нашого дослідження. Усі моделі турбулентності, що використовуються в роботі, мають значні допущення, які спрощують розрахунки та потребують додаткової експериментальної перевірки. Крім того, з метою економії обчислювальних ресурсів використано квазістаціонарну постановку задачі, яка також може вносити похибки в отримані результати. Також не були враховані можливі зміни дорожньої обстановки та вплив бокового вітру.

Таким чином, для підтвердження отриманих результатів у подальшому необхідно провести експериментальні дослідження процесу взаємодії вантажівки та мотоцикла, а також дослідити вплив на нього додаткових дорожніх факторів.

**Висновок.** Для різних сіток і моделей турбулентності було виконано комплексне моделювання аеродинаміки мотоцикла в умовах турбулентного повітряного сліду, створеного великою вантажівкою. Нижче наведені результати цього дослідження:

- найнебезпечнішою зоною при обгоні автомобіля є ділянка, що починається від передньої частини салону, довжиною близько 3-4 метрів. На цій ділянці перепад тиску на бортах мотоцикла спочатку падає з приблизно 100 Па при русі вздовж причепа до 50 Па, тобто вдвічі, а потім відразу зростає майже в 7 разів (приблизно з 50 до 350 Па). Якщо абсолютні значення таких перепадів тиску можуть бути непомітними, то різкі зміни менш ніж за 1 секунду можуть призвести до короткочасної втрати керування недосвідченим водієм, що значно підвищує небезпеку маневру обгону в присутності вантажівки.

- Необхідно давати рекомендації водіям мотоциклів при обгоні вантажівок дотримуватися дистанції між мотоциклом і автомобілем не менше 1 метра.

## Список літератури

1. WHO kicks off a decade of action for road safety. available via WHO. URL: <https://www.who.int/news/item/28-10-2021-who-kicks-off-a-decade-of-action-for-road-safety> (date of access: 17.10.2024).
2. Ahmed S. R., Ramm G., Faltin G. Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE International Congress and Exposition. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1984. URL: <https://doi.org/10.4271/840300> (date of access: 17.10.2024).
3. Comparative Analysis of Turbulence Models for Automotive Aerodynamic Simulation and Design / D. Igali et al. *International Journal of Automotive Technology*. 2019. Vol. 20, no. 6. P. 1145–1152. URL: <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0107-7> (date of access: 17.10.2024).
4. Hasmar Halim, Zubair Saing. Overtake Behavior Model of Motorcycle on Accident Risk. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(5), P. 12556–12567. DOI:10.5281/zenodo.39086822020.
5. Corin R. J., He L., Dominy R. G. A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. Vol. 96, no. 8-9. P. 1390–1411. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.006> (date of access: 17.10.2024).
6. Effect of Crosswinds on the Aerodynamics of Two Passenger Cars Crossing Each Other / A. Hammad et al. *International Journal of Automotive Technology*. 2019. Vol. 20, no. 5. P. 997–1008. URL: <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0094-8> (date of access: 17.10.2024).
7. Howell J., Garry K., Holt J. The Aerodynamics of a Small Car Overtaking a Truck. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*. 2014. Vol. 7, no. 2. P. 626–638. URL: <https://doi.org/10.4271/2014-01-0604> (date of access: 17.10.2024).
8. Bodhisagar J Tayade, P.S. Bajaj. A Review on The Effect of Aerodynamics on Car Overtaking Truck Using CFD Analysis Method. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022. Volume: 09 Issue: 08. P. 1273–1279.
9. Wiński K., Piechna A. Comprehensive CFD Aerodynamic Simulation of a Sport Motorcycle. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 16. P. 5920. URL: <https://doi.org/10.3390/en15165920> (date of access: 17.10.2024).
10. Design and analysis of an aerodynamic kit for a two wheeled race motorcycle / M.Palanivendhan et al. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 7239–7246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.635> (date of access: 17.10.2024).

## Referenses

1. WHO kicks off a decade of action for road safety. available via WHO. <https://www.who.int/news/item/28-10-2021-who-kicks-off-a-decade-of-action-for-road-safety>
2. Ahmed S. R., Ramm G., &Faltin G. (1984). Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE International Congress and Exposition*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States,. URL: <https://doi.org/10.4271/840300>.
3. Igali, D., Mukhmetov, O., Zhao, Y.,Sai Cheong Fok & Soo Lee Teh(2019). Comparative Analysis of Turbulence Models for Automotive Aerodynamic Simulation and Design.*International Journal of Automotive Technology*. Vol. 20, no. 6. P. 1145–1152. URL: <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0107-7>.

4. 7asmar Halim, Zubair Saing (2020). Overtake Behavior Model of Motorcycle on Accident Risk. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(5), P. 12556–12567. DOI:10.5281/zenodo.39086822020.
5. Corin R. J., He L., Dominy R. G. (2008). A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 96, no. 8-9. P. 1390–1411. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.006>.
6. Ahmad Hammad, Tao Xing, Vibhav Durgesh & John C. Crepeau (2019). Effect of Crosswinds on the Aerodynamics of Two Passenger Cars Crossing Each Other / *International Journal of Automotive Technology*. Vol. 20, no. 5. P. 997–1008. URL: <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0094-8>.
7. Howell J., Garry K., & Holt J. (2014). The Aerodynamics of a Small Car Overtaking a Truck. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*. Vol. 7, no. 2. P. 626–638. URL: <https://doi.org/10.4271/2014-01-0604>.
8. Bodhisagar J Tayade, P.S. Bajaj. (2022). A Review on The Effect of Aerodynamics on Car Overtaking Truck Using CFD Analysis Method. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 09 Issue: 08. P. 1273–1279.
9. Wiński K., & Piechna A. (2022). Comprehensive CFD Aerodynamic Simulation of a Sport Motorcycle. *Energies*. Vol. 15, no. 16. P. 5920. URL: <https://doi.org/10.3390/en15165920>.
10. M. Palanivendhan, Devansh Nagpal, D. Ayush Rao, Jennifer Philip, M. Srinivas Ganapathi (2021). Design and analysis of an aerodynamic kit for a two wheeled race motorcycle / *Materials Today: Proceedings*. Vol. 45. P. 7239–7246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.635>.

**Liudmyla Tarandushka**, Prof., DSc, **Maksym Rud**, Assoc.Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Batrachenko**, Prof., DSc.

*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

### **Improving Road Safety Through Computational Analysis of the Aerodynamic Interaction Between a Truck and a Motorcycle**

The purpose of this paper is to improve road safety by analyzing the aerodynamic interaction between a truck and a motorcycle using computational fluid dynamics (CFD). The study focuses on evaluating the accuracy and reliability of different turbulence models commonly used in CFD simulations to determine their impact on motorcycle stability and control during overtaking maneuvers.

The research involved simulating the aerodynamic flow between a truck and a motorcycle using three different turbulence models: Spalart-Allmaras (SA), k-epsilon (k- $\epsilon$ ), and k-omega (k- $\omega$ ). Simplified CAD models of a European truck and a road motorcycle were created, and airflow structures were analyzed for each turbulence model. The aerodynamic drag acting on both the truck and motorcycle was evaluated, along with the effect of flow structure on motorcycle handling. The analysis included assessing the computational resources required for each model and comparing the predicted results with experimental data from previous studies.

The study concludes that different turbulence models produce varying flow structures and aerodynamic forces, with significant differences in their effect on motorcycle stability. The k- $\omega$  model was found to provide the most accurate predictions, although further experimental validation is required. The results highlight critical areas where drivers should maintain caution, particularly during overtaking maneuvers near large trucks.

**aerodynamic analysis, turbulence models, motorcycle safety, CFD modeling, road safety**

*Одержано (Received) 17.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 21.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**І.А. Шльончак**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Батраченко**, проф., д-р. техн. наук  
*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*  
*e-mail: Igor\_Shlionchak@ukr.net; avbatrachenko1980@gmail.com*

## Утилізація автомобільних шин в українській перспективі

В статті проаналізовано сучасний стан утилізації автомобільних шин в українській перспективі, враховуючи світовий досвід. Виконано аналіз методів переробки зношених автомобільних шин з урахуванням вітчизняних та закордонних досліджень. Показано світову проблему збору та утилізації зношених автомобільних шин. Наголошено, що останні є основним видом гумових відходів в світі. В статті встановлено, що найбільш поширені методи утилізації зношених автомобільних шин поділяються на фізичні та хімічні. Представлені переваги та недоліки основних методів переробки гумових відходів, зокрема автомобільних шин. Показано, що найбільш перспективними є технології, що дозволяють розділяти основні компоненти автомобільних шин: гуму, сталь, текстиль. Зроблено висновок про те, що методу або технології, яка б дозволяла проводити процес утилізації автомобільних шин при невисоких витратах та з мінімізацією шкідливого впливу на атмосферу, не існує.

**зношені автомобільні шини, утилізація відходів, гумова крихта, проблема збору та утилізації відходів**

**Постановка проблеми.** Насьогодні людство споживає більше ресурсів, ніж планета може відновити. Згідно з даними Global Footprint Network, щороку настає день, після якого Земля не встигає відновити те, що було спожито. Відтак, важливим завданням у контексті виснаження природних ресурсів і забруднення навколишнього середовища є досягнення балансу між економічним зростанням і екологічною стійкістю. Це можливо завдяки переходу країн на принципи циркулярної економіки. У лінійній економічній моделі ресурси видобуваються, перетворюються на продукцію, а після використання перетворюються на відходи, які не мають подальшого застосування. Це призводить до ряду проблем: низька ефективність використання ресурсів, залежність економіки від первинної сировини, значні обсяги відходів, а також екологічна та соціальна напруга [1].

В усьому світі гостро стоїть проблема збору та утилізації використаних автомобільних шин. В зв'язку з динамічним ростом парку автомобілів в усіх розвинених країнах світу має місце постійне накопичення зношених шин. За даними Європейської асоціації з вторинної переробки шин (ETRA) у Європі щорічно виходять з експлуатації понад 2 млн. тон автомобільних шин. З цього об'єму лише 10% утилізуються шляхом подрібнення і 20% використовуються як паливо. Решта накопичується на звалищах. В Україні це питання стоїть ще гостріше, тому що відсоток утилізованих шин в нашій країні значно нижчий, ніж у Європі [1-2].

Однією з найважливіших проблем сьогодення є кваліфіковане використання полімерних та, зокрема, гумотехнічних відходів, які нагромаджуються на організованих та стихійних звалищах, що підвищує рівень екологічної небезпеки на прилеглих територіях у результаті потрапляння шкідливих речовин у довкілля [2].

Основним видом гумових відходів є зношені автомобільні шини – щороку у світі їх нагромаджується орієнтовно 10 млн т. У численних дослідженнях доведено, що неконтрольоване нагромадження шин на звалищах призводить до забруднення і деградації ґрунтів, зокрема і важкими металами [2-3].

В Україні річний приріст зношених шин становить 250–300 тис. т. Рівень утилізації шин у нашій країні, за різними оцінками, не перевищує 10 %, натомість у більшості розвинутих країн світу переробляють 70–90 % таких відходів [2-3].

Існує декілька методів утилізації відпрацьованих автошин це як фізичні так і хімічні методи. Найбільш перспективними є технології, що дозволяють розділяти основні компоненти автопокришок: гуму, сталь, текстиль [1].

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз методів утилізації шин в українській перспективі, враховуючи світовий досвід переробки автомобільних шин. При цьому береться до уваги раціональний варіант методу утилізації шин для України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема утилізації зношених автомобільних шин розглядається як вітчизняними науковцями, так і закордонними. Питання переробки гумових відходів постає в світі надзвичайно гостро, оскільки маса відпрацьованих шин з кожним роком збільшується.

В науковій роботі [1] автори представили результати розробки екологічно чистого, високоефективного методу і обладнання для утилізації зношених автомобільних шин. В роботі показано метод утилізації шин на базі гідроабразивної деструкції гуми. Принцип дії обладнання базується на використанні ефекту силової дії струменя води високого тиску, який поєднується з роботою різання, що виконують абразивні частки, які рухаються в потоці. Приведено також розробку комплексу обладнання для очищення та регенерації забрудненої води з метою її повторного використання для водопостачання обладнання рідинних струменевих технологій та іншого виробничого обладнання промислових підприємств.

Автори роботи [1] також обґрунтовують проблему утилізації шин, представляючи способи переробки зношених шин в провідних країнах світу (рис. 1). З представленої таблиці видно, що лідерами в переробці зношених автомобільних шин є Японія та Німеччина. Однак і в цих країнах більшість автошин утилізується методом спалювання, що не є ефективним в енергетичному сенсі. Дослідження показали, що на виробництво автомобільних шин витрачається енергії в 3-4 рази більше, ніж її можна отримати при спалюванні. Автори розділяють всі можливі варіанти переробки автомобільних зношених шин на дві основні групи: фізичні методи та хімічні (рис. 2).

| Країна/<br>Регіон         | Способи використання старих автопокришок (%) |                                   |                  |              |                             |      |
|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------|-----------------------------|------|
|                           | Спалю-<br>вання                              | Пере-<br>робка<br>в сиро-<br>вину | Віднов-<br>лення | Екс-<br>порт | Вивіз<br>на<br>зва-<br>лище | Інше |
| США                       | 23                                           | 10                                |                  | 3            | 63                          | 1    |
| Японія                    | 43                                           | 12                                | 9                | 25           | 8                           | 3    |
| Німеччи-<br>на            | 38                                           | 15                                | 18               | 18           | 2                           | 9    |
| Великоб-<br>ританія       | 9                                            | 6                                 | 18               |              | 67                          |      |
| Європей-<br>ський<br>Союз | 30                                           | 20                                |                  |              | 50                          |      |

Рисунок 1 – Способи переробки зношених шин в провідних країнах світу

Джерело: на підставі [1]

Одним із поширених фізичних методів переробки автомобільних шин є дробіння з подальшим спалюванням гуми. Відома провідна фірма США під назвою «Waste Management Inc» використовує установки для дробіння автомобільних шин з подальшим постачанням крихти, як паливо, на целюлозно-паперові комбінати та цементні заводи. Також гумова крихта, як паливний матеріал, використовується у вигляді 10% добавки при спалюванні вугілля. Цією ж фірмою проводиться експеримент по спалюванню гуми крупного дроблення (до 25 мм) в циклонних топках енергетичних казанів. Частка гуми складає 2-3% від маси вугільного палива. Складність процесу дроблення зношених шин (особливо з металокордом) стимулювала розвиток технології спалювання шин в цільному вигляді [1-2].

В Англії фірма "Avon Rubber" експлуатує печі для спалювання шин в цільному вигляді з 1973 р., тобто має вже майже 45-річний досвід в цій області. В країні розглядається питання будівництва електростанцій потужністю 20-30 МВт для спалювання 12 млн. шин в рік масою 90 тис. тон. В країнах колишнього СРСР за такою технологією працюють лише в Казахстані [1, 4]. Однак, головним недоліком спалювання зношених автомобільних шин є той факт, що при спалюванні зношених шин, як і при спалюванні нафти, знищуються хімічно цінні речовини, що містяться в матеріалі таких шин. Енергетичний баланс спалювання зношених шин не вигідний, якщо порівнювати витрати енергії на виробництво шин. Також у порівнянні з іншими методами переробки, оскільки використовується тільки енергетичний ресурс шини, а цінний матеріал при цьому знищується.

Автори роботи [2] відносять до термічних методів переробки шин газифікацію та піроліз. Зазначається, що процес газифікації відбувається за температури 800–1200°C. При цьому утворюється велика кількість газоподібних продуктів, які можна використовувати як паливний газ, або як синтез-газ. А твердий залишок – пірокарбон. Процес піролізу зношених шин та інших гумових відходів ведуть на установках періодичної дії за температури 450–500 °C. Під час цього утворюється рідкий продукт – піроконденсат, газ піролізу та твердий залишок – пірокарбон. Піроконденсат піролізу здебільшого використовують як пічне паливо. Такий спосіб використання є економічно не вигідним, враховуючи порівняно низьку вартість цього виду палива [5-7]. Автори роботи [2] пропонують визначити склад та властивості піроконденсату піролізу зношених автомобільних шин та вузьких фракцій, виділених з нього, з метою встановлення найраціональніших способів їхнього використання в Україні. Для проведення досліджень використовували піроконденсат, отриманий у промислових умовах на технологічній установці низькотемпературного піролізу ТОВ «Еко Пром Груп» (с. Гранки-Кути Миколаївського р-ну Львівської обл.).

Авторами досліджень [2] встановлено, що у піроконденсаті та його фракціях практично не міститься важких металів, характерних для нафтових фракцій та залишків (V, Ni). Натомість виявлено Ca, Fe, Zn. Причому Fe і Zn концентруються переважно у залишку від перегонки піроконденсату, а Ca – у бензиновій фракції.

Автори роботи [8] зазначають, що найбільшого поширення в сфері рециклінгу зношених автомобільних шин набула технологія їх подрібнення у високоеластичному стані при помірних швидкостях, не дивлячись на значно вищі витрати енергії в порівнянні з криогенною технологією. За цією технологією перероблення покришок ведеться в наступній послідовності: миття – вирізка бортів – попереднє дроблення – грубе дроблення – дрібне дроблення – видова сепарація – подрібнення до крихти. Традиційним обладнанням, що застосовується для дроблення гумових відходів, зазначають автори, є вальці. Як правило застосовують дискові та роторні подрібнювачі. Однак схема, заснована на застосуванні вальців, є більш продуктивною й менш

енергоємною. Однак, світова практика утилізації шин використовує криогенне подрібнення зношених шин – метод, який має свої переваги перед іншими методами переробки автомобільних шин. Автори детально обґрунтовують механізми, які застосовуються під час переробки шин криогенним подрібненням. Крім цього автори роботи обґрунтовують подальше використання гумової крихти у складі асфальтобетонних дорожніх покриттів. Завдяки підвищеним фрикційним властивостям і кращому опору зносу такі покриття можуть бути ефективними на гірських дорогах, на площах і вулицях з інтенсивними транспортними потоками, на злітнопосадочних смугах аеродромів, на мостах і в тунелях. Зазначається досить широкий спектр використання крихти зношених автомобільних шин в різних сферах життєдіяльності людини.

| Хімічні методи                    |            |                           | Фізичні методи          |          |
|-----------------------------------|------------|---------------------------|-------------------------|----------|
| Піроліз                           | Спалювання | Крекінг                   |                         |          |
| Способи подрібнення вторинних гум |            |                           |                         |          |
| За температурою подрібнення       |            |                           |                         |          |
| При від'ємних температурах        |            | При додатних температурах |                         |          |
| За механічною дією                |            |                           |                         |          |
| Ударом                            | Стиранням  | Стисненням                | Стисненням із зрушенням | Різанням |

Рисунок 2 – Методи переробки автомобільних шин

Джерело: на підставі [1]

Автор дослідження [9] представляє детальне обґрунтування ефективного використання зношених автомобільних шин в дорожньому будівництві. В роботі зазначаються суттєві переваги такої утилізації шин, а саме: екологічність та безвідходність, підвищення в'язкості (як наслідок зростає стійкість асфальтобетонного покриття до розтріскування) та зменшення шумів під час руху транспортних засобів на 3-6 дБ. Дослідники пропонують організаційну структуру збору та утилізації зношених автомобільних шин на Житомирщині (рис. 3). Пропонується раціонально розділити технологічний процес утилізації зношених автомобільних шин на дві частини: первинну та глибоку переробку. На первинну переробку зношені автомобільні шини звозять з пунктів їх прийому. Первинна переробка повинна включати очищення зношених автомобільних шин від бруду та негумових шипів, видалення бортових кілець та нарізання гуми шматками 200×200 мм на різальних валках. Після первинної переробки напівфабрикат (шматки гуми) транспортують до пункту глибокої переробки, технологічна схема якого включає грубе та тонке подрібнення на шредерах, видалення залишків металокорду магнітними сепараторами, видалення текстильного корду на вібростатах з використанням пневмопотoku та розділення гуми на різні класи крупності на вібростатах.

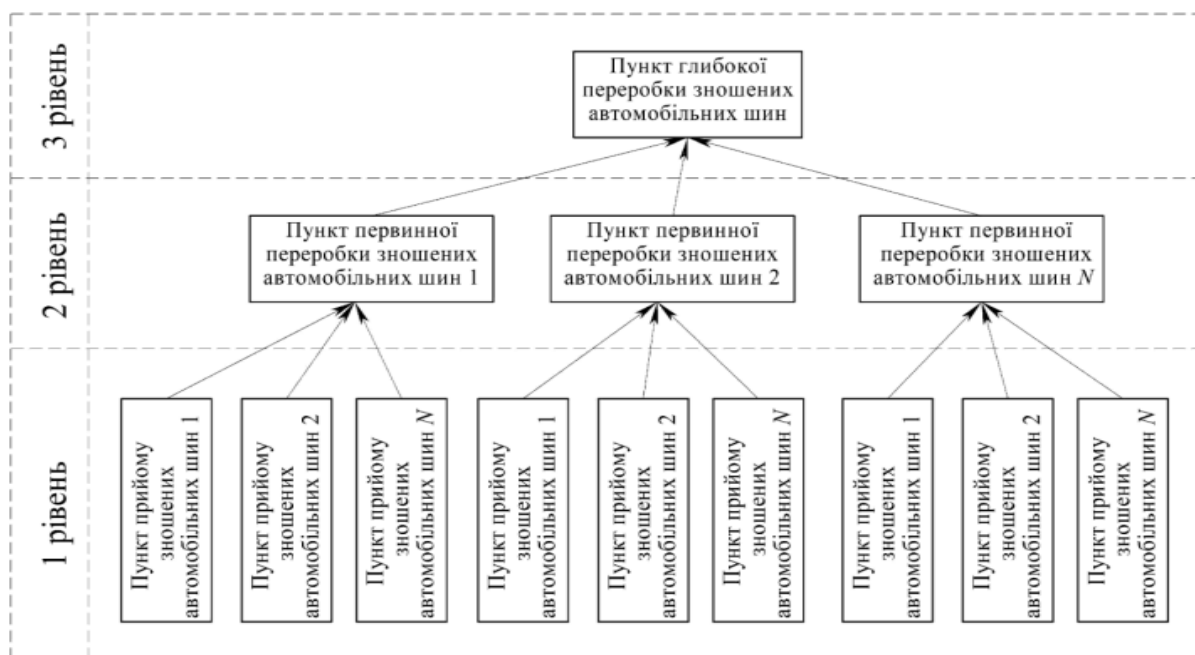


Рисунок 3 – Організаційна структура збору та утилізації зношених автомобільних шин у Житомирській області

Джерело: на підставі [9]

Автори роботи[10] зазначають, що не існує методу або технології, яка б дозволяла проводити процес утилізації при невисоких затратах і з мінімізацією шкідливого впливу на атмосферу. В статті повідомляється, що більшість методів утилізації відпрацьованих автомобільних шин передбачає використання гумової крихти, але при переробці шин із металокордом проблема одержання гумової крихти не вирішена. Технології кріогенного здрібнення дороги, вимагають складного обладнання і значної кількості азоту. Тому при відносно невеликих обсягах – нерентабельні. З точки зору авторів, перспективним методом утилізації шин із металокордом є метод низькотемпературного піролізу, який не вимагає тонкого здрібнювання сировини. Таке виробництво, як зазначають дослідники, характеризується невеликим навантаженням на довкілля, в той же час найбільш повно вирішується проблема використання відпрацьованого матеріалу.

**Висновки.** Підсумовуючи вище зазначене, можна зробити декілька основних висновків. По-перше, найбільш поширені методи утилізації зношених автомобільних шин поділяються на фізичні та хімічні. По-друге, найбільш перспективними є технології, що дозволяють розділяти основні компоненти автомобільних шин: гуму, сталь, текстиль. По-третє, можна вважати, що методу або технології, яка б дозволяла проводити процес утилізації автомобільних шин при невисоких витратах та з мінімізацією шкідливого впливу на атмосферу, не існує.

## Список літератури

1. Утилізація автошин методом гідроабразивної деструкції гуми. Монографія / А. О. Белятинський, В. М. Бадах, Ю.С. Головкин, В. М. Першаков. Під заг. ред. д.т.н., проф. В. М. Першакова. К. ТОВ «НВФ «Славутич-Дельфін», 2018. 148 с.
2. Склад і властивості піролізу зношених автомобільних шин / К. О. Гринишин, В. Й. Скорохода, Т. І. Червінський. Національний університет "Львівська політехніка" Вип.4, №2. 2021.С. 28-32.
3. Horner J. M. (1999). Environmental Health Implications of Heavy Metals Pollution From Car Tyres. Rev.

- Environ. Health Journal*. 11(4). P. 175–178.
4. Утилізація гумових відходів методом низькотемпературного піролізу/ Гринишин К.О., Скорохода В.Й.. *X Ювілейна Міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія та сучасні технології» / тези доповідей, 23-24 листопада. У 6-и томах. Т. II. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ. 2021. 170 с.*
  5. Volfson S. I., Fafurina E. A., Fafurin A. V. (2011). Metody utilizacii shyn i rezinotekhnicheskikh izdelij. *Vestnyk Kazanskogo Tehnologicheskogo universiteta*. P. 74–79.
  6. Gunich S. V., Janchukovskaja E. V. (2016). Analiz processov piroliza othodov proizvodstva i potreblenija. *Izvestija vuzov. Prikladnaja himija i biotekhnologija*. 16(1). P. 86–93.
  7. Ryzhkov S., Rudyuk N., Markina L. (2016). Research of thermal conductivity of the condensed mass of the whole waste tires and determination of their optimum arrangement in the pyrolysis reactor. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*. 82 (4/5). P.12–18.
  8. Бойченко С. В., Іванченко О. В., Лейда Казимір, Фролов В. Ф., Яковлєва А. В. (за редакцією професора С. В. Бойченка). *Екологістика, рециклінг і утилізація транспорту: навчальний посібник. К. НАУ. 2019. 266 с.*
  9. Нагурський А.О. Використання каучуків та гуми для модифікування дорожніх бітумів / Нагурський А.О., Гринишин О.Б. Хлібишин Ю.Я.// *Львівські хімічні читання 2015: XV наук. конф., 24-27 травня 2015р. тези доп. Львів, 2015. Т10.*
  10. Пляцук Л.Д. Утилізація гумових відходів / Л.Д. Пляцук, Л.П. Гурець, О.П. Будьонний // *Екологічна безпека, Вісник КДПУ імені М.Остроградського. Випуск 5 (46), 2007. С. 152-154*

## References

1. Bieliatynskiy, A. O., Badakh, V. M., Holovko, Yu.S., & Pershakov, V. M. (2018) Utylizatsiia avtoshyn metodom hidroabrazynnoi destruktzii humy. Monohrafiia. Kyiv: TOV «NVF «Slavutych-Delfin», 148 p. [in Ukrainian].
2. Hrynshyn, K. O., Skorokhoda, V. Y., & Chervinskyi, T. I. (2021) Sklad i vlastyvoli pirokondynsatu pirolizu znoshenykh avtomobilnykh shyn. *Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika", №4 (2)*. P. 28-32. [in Ukrainian].
3. Horner, J. M. (1999). Environmental Health Implications of Heavy Metals Pollution From Car Tyres. *Rev. Environ. Health Journal*. 11(4). P. 175–178.
4. Hrynshyn K.O., & Skorokhoda V.I., (2021) Utylizatsiia humovykh vidkhodiv metodom nyzkotemperaturnoho pirolizu *X Yuvileina Mizhnarodna naukovopraktychna internet-konferentsiia zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh uchenykh «Khimiia ta suchasni tekhnologii», T. II. – Dnipro: DVNZ UDKhTU. 170 p.* [in Ukrainian].
5. Volfson S. I., Fafurina E. A., & Fafurin A. V. (2011). Metody utilizacii shyn i rezinotekhnicheskikh izdelij. *Vestnyk Kazanskogo Tehnologicheskogo universiteta..* P. 74–79.
6. Gunich, S. V., & Janchukovskaja, E. V. (2016). Analiz processov piroliza othodov proizvodstva i potreblenija. *Izvestija vuzov. Prikladnaja himija i biotekhnologija*. 16(1). P. 86–93.
7. Ryzhkov S., Rudyuk N., & Markina L. (2016). Research of thermal conductivity of the condensed mass of the whole waste tires and determination of their optimum arrangement in the pyrolysis reactor. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, №82 (4/5). P. 12–18.
8. Boichenko, S. V., Ivanchenko, O. V., Leida, Kazymir, Frolov, V. F., & Yakovlieva, A. V. (2019) *Ekolohistyka, retsyklinh i utylizatsiia transportu: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: NAU. 266 p. [in Ukrainian].
9. Nahurskyi, A.O. (2015) Vykorystannia kauchukiv ta humy dlia modyfikuvannia dorozhnykh bitumiv *Lvivski khimichni chytannia, XV nauk. konf., 24-27 travnia 2015r.: tezy dop.*Lviv. P. 10-15. [in Ukrainian].
10. Pliatsuk, L.D., Hurets, L.P., Budonnyi, O.P. (2007) Utylizatsiia humovykh vidkhodiv, *Ekolohichna bezpeka, Visnyk KDPU imeni M.Ostrohradskoho, №5 (46)*. P. 152-154. [in Ukrainian].

**Ihor Shlonchak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Batrachenko**, Prof., DSc.  
Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

## The Recycling of Car Tires in the Ukrainian Perspective

The purpose of the work is to analyze the methods of recycling tires in the Ukrainian perspective, taking into account the world experience of recycling car tires. At the same time, a rational version of the tire recycling method for Ukraine is taken into account.

The article analyzes the current state of recycling car tires in the Ukrainian perspective, taking into account world experience. An analysis of the methods of recycling used car tires was carried out, taking into

account domestic and foreign research. The global problem of collection and disposal of used car tires is shown. It is emphasized that the latter are the main type of rubber waste in the world. The article found that the most common methods of disposal of worn car tires are divided into physical and chemical. The advantages and disadvantages of the main methods of processing rubber waste, in particular car tires, are presented.

Summarizing the research, several main conclusions can be drawn. First, the most common ways of disposing of used car tires are divided into physical and chemical. Secondly, the most promising are the technologies that allow separating the main components of car tires: rubber, steel, textiles. Third, it can be assumed that there is no method or technology that would allow the process of recycling car tires to be carried out with low costs and minimizing the harmful impact on the atmosphere.

**worn car tires, waste recycling, rubber crumb, problem of waste collection and recycling**

*Одержано (Received) 15.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 656.1**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.227-235](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.227-235)

**О.Л. Ляшук**, проф., д-р. техн. наук, **У.М. Плекан**, доц., канд. екон. наук, **О.П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **Ю.Я. Вовк**, доц., канд. техн. наук, **Н.Я. Рожко**, проф., д-р. екон. наук

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

*e-mail: kaf\_am@ukr.net*

## **Аналіз впливу осьових навантажень на стан автомобільних доріг**

У статті розглянуто основні аспекти аналізу впливу осьових навантажень на автомобільні дороги, що включають їхній вплив на довговічність дорожнього покриття та ризик пошкоджень. Окреслено проблему перевищення дозволених навантажень, що призводить до перевантаження на дорогах, та наведено чинні обмеження на максимальну вагу і розподіл навантаження на окремі осі автомобілів. Акцентовано на необхідності розвитку системи незалежного моніторингу якості дорожнього покриття як ключового елемента для підвищення безпеки дорожнього руху та покращення якості дорожньої інфраструктури. Запропоновано перспективні заходи щодо впровадження автоматизованих систем зважування в русі для оперативного контролю та управління навантаженнями на дорогах, що сприятиме зниженню ризику аварійності та зносу покриття.

**багатоколісні транспортні засоби, дорожнє покриття, осьове навантаження, вантажні транспортні засоби, автомобільні дороги**

**Постановка проблеми.** Більшість українських доріг була збудована в період 60–80-х років минулого століття, коли нормативне навантаження на вісь складало 6 тонн, що значно нижче сучасних вимог. За європейськими стандартами, дороги повинні витримувати навантаження в 11,5 тонн на вісь. Лише близько чверті доріг державного значення в Україні відповідають цим стандартам.

Перевантаження транспортних засобів, особливо великовантажних автомобілів, залишається поширеною проблемою і часто суттєво перевищує встановлені норми, що значно прискорює руйнування дорожнього покриття. Попри наявність законодавчих обмежень на масу транспортних засобів для доріг державного і місцевого значення, ці правила часто ігноруються, що призводить до швидкого зносу і пошкодження доріг.

© О.Л. Ляшук, У.М. Плекан, О.П. Цьонь, Ю.Я. Вовк, Н.Я. Рожко, 2024

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато дослідників приділяли увагу визначенню допустимих осьових навантажень безрейкових транспортних засобів. Науковці розглядали вплив осьових навантажень з різних аспектів: від технічного стану транспортних засобів [1, 2] до умов руху [8]. Гриньків А. В., Аулін В. В. відзначають, що своєчасна діагностика стану транспортних засобів зменшує негативний вплив на дорожнє покриття [2]. Поляков В. М. досліджував вплив швидкості руху на навантаження, що передається автомобілем на дорогу [3]. Поляков В. М. та Разбойніков О. О. вивчали, як нерівності дорожнього покриття впливають на взаємодію колеса з дорогою, та розробили метод визначення рівнодіючої сили для кращого розуміння розподілу навантажень [4]. Разбойніков О. О. у своїх дисертаційних дослідженнях розглядав питання покращення курсової стійкості легкових автомобілів на нерівних дорогах [5]. Сергійчук А. А., Аулін В. В., Гриньків А. В., Цьонь О. П. підкреслюють значення контролю технічного стану транспортних засобів для зменшення руйнівного впливу на дороги. Вчені здійснювали моніторинг осьових навантажень і їх вплив на дорожнє покриття, що є важливим для довговічності автомобільних доріг [7, 8].

Проведені дослідження підтверджують важливість контролю осьових навантажень транспортних засобів для збереження якості доріг і забезпечення безпеки руху. Незважаючи на значні наукові досягнення в сфері безпеки автомобільних перевезень, проблема перевищення дозволених навантажень та перевантаження доріг залишається актуальною. Методи попередження руйнування автомобільних доріг загального користування через порушення норм проїзду великоваговими транспортними засобами в Україні потребують подальших досліджень і вдосконалення.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є виявлення основних проблем руйнівного впливу маси вантажних транспортних засобів на стан автомобільних доріг.

Для досягнення мети були визначені наступні завдання:

- провести аналіз сутності осьового навантаження та його впливу на автомобільні дороги;
- описати максимально допустимі навантаження на окремі осі транспортних засобів;
- дослідити сучасний склад вантажних транспортних засобів, що експлуатуються на дорогах України;
- запропонувати послідовність етапів аналізу впливу осьових навантажень на дорожнє покриття;
- обґрунтувати значення системи незалежного контролю якості в дорожній інфраструктурі.

**Виклад основного матеріалу.** Загальна протяжність автомобільних доріг в Україні становить близько 169 600 км, з яких лише 48% мають тверде покриття. У багатьох країнах діють обмеження на максимальну вагу та розподіл навантаження на осі транспортних засобів. Однак проблема нелегальних вантажів, перевищення допустимих норм та перевантажень транспортних засобів залишається актуальною. Запобігти перевантаженням можна за допомогою ефективного контролю та обліку вантажів. Вагові комплекси та системи вимірювання маси є важливими інструментами для виявлення порушень, а застосування високих штрафів та відповідальності за перевантаження може стимулювати дотримання норм.

Осьове навантаження, яке також називають навантаженням на вісь, визначається як тиск, що створюється сумарною масою транспортного засобу і передається на дорожню поверхню через колеса однієї осі. Для розрахунку осьового навантаження недостатньо просто поділити загальну масу автомобіля на кількість осей, оскільки вага

розподіляється нерівномірно. Як правило, задні осі несуть більше навантаження, ніж передні. Для точного визначення навантаження на кожну вісь використовуються спеціальні алгоритми або вагове обладнання, оскільки теоретичний розрахунок може мати похибку близько 10%.

Для визначення осевого навантаження транспортного засобу потрібні дані про масу тягача та причепа, які зазвичай вказані у реєстраційних документах. Також важливо знати актуальну масу вантажу, яку можна знайти у товарно-транспортній накладній. Загальну масу причепа з вантажем розподіляють таким чином: 25% припадає на тягач, а 75% – на причіп. Щоб розрахувати навантаження на кожну вісь причепа, загальне навантаження на причіп ділять на кількість його осей.

При оцінці міцності дорожнього покриття важливо враховувати навантаження на найбільш навантажену вісь транспортного засобу. У транспортному потоці вантажних автомобілів значну частку займають багатовісні транспортні засоби, які створюють навантаження на вісь у межах 80–125 (127) кН. Їхня багатовісність враховується при розрахунку навантаження з урахуванням відстані між осями.

Максимальна фактична маса вантажних транспортних засобів наведена у таблиці 1.

Таблиця 1. - Максимальна фактична маса вантажних транспортних засобів

| Тип вантажного автомобіля | Максимальне значення, т | Кількість осей | Максимальне навантаження на вісь, т |
|---------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|
| двовісний                 | 18                      | одинарна вісь  | 11,5                                |
| трьохвісний               | 25                      | здвоєні осі    | 11,5-23                             |
| чотирьохвісний            | 38                      | строєні осі    | 21-24                               |

Схема вантажного автомобіля з позначенням максимально допустимих навантажень на окремі осі відповідно до діючих законів і нормативів в Україні відображена на рисунку 1. При цьому осі вважаються здвоєними або строєними, якщо відстань між ними не перевищує 2,5 м.

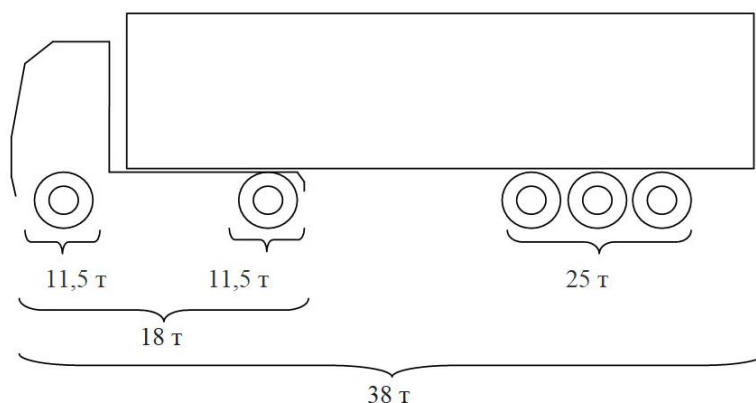


Рисунок 1 – Максимальні значення фактичної маси для вантажівок

*Джерело: розроблено авторами*

Сучасний склад поширених вантажних транспортних засобів відображений на рисунку 2.

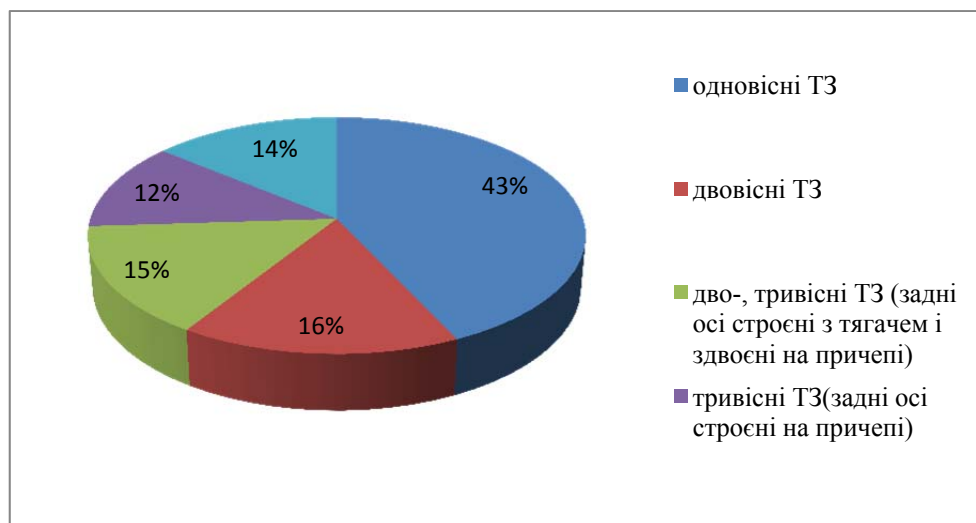


Рисунок 2. Сучасний склад вантажних транспортних засобів на автомобільних дорогах України

*Джерело: розроблено авторами*

Поширення багатоколісних транспортних засобів для зменшення навантаження на окрему вісь – технічний спосіб обійти нормативні вагові обмеження, що націлені на зменшення негативного впливу на дороги та інфраструктуру, а також забезпечення безпеки на автомобільних шляхах. Хоча такі вантажні транспортні засоби формально відповідають встановленим правилам, вони не завжди вирішують головні проблеми, як-от надмірний знос дорожнього покриття, екологічне навантаження та підвищений ризик аварій.

Вважаємо за доцільне вирішувати дане питання шляхом використання інноваційних матеріалів і технологій для транспорту, які сприятимуть зниженню ваги, ефективнішому використанню палива та зменшенню шкідливих викидів. В довгостроковій перспективі необхідно переглядати законодавство, щоб забезпечити реальну безпеку та стійкість дорожньої інфраструктури.

Важливим фактором у питанні параметрів дорожнього покриття є визначення типу розрахункового навантаження, особливо для нежорсткого (гнучкого) дорожнього покриття. Якщо тип навантаження визначено неправильно або неточно, це призведе до суттєвих помилок в оцінці міцності та працездатності дороги та вплине на тривалість експлуатації останньої, її стійкість до деформацій, а також збільшить витрати на ремонт і обслуговування. Нежорстке дорожнє полотно має специфічну реакцію на різні типи навантажень (наприклад, на статичне та динамічне навантаження від транспортних засобів), тому помилки в розрахунках можуть призвести до передчасного руйнування покриття.

Завжди важливо брати до уваги реальні умови експлуатації дороги, включаючи вагу транспортних засобів, інтенсивність руху та кліматичні умови, щоб запобігти проблемам з її міцністю та довговічністю.

Аналіз впливу розрахункових осьових навантажень на автомобільні дороги є важливою частиною процесу проектування, будівництва і експлуатації доріг. Цей

аналіз включає в себе визначення та оцінку навантажень, які різні види транспортних засобів створюють на дорожньому покритті.

Аналіз впливу осьових навантажень є важливим для забезпечення тривалої та безпечної експлуатації автомобільних доріг. Недостатньо міцне дорожнє покриття може призвести до його пошкоджень та збитків, а також спричинити загрозу безпеці дорожнього руху. Тому правильний аналіз та відповідне проектування дорожнього покриття є важливою складовою будь-якого інфраструктурного проекту.

Автомобільна дорога повинна відповідати розрахунковим навантажень, на які вона запроектована. Проблемою в даний час залишається постійне прагнення автомобілістів збільшити осі навантаження.

Надмірні осьові навантаження можуть призвести до руйнування доріг і мостів, збільшення ризику дорожніх аварій, зменшення тривалості служби дороги і підвищення витрат на ремонт та обслуговування. Для вирішення окреслених проблем можна застосовувати технологічні, інфраструктурні або ж рішення у сфері підвищення свідомості громадян. Сучасні технології, такі як системи моніторингу навантаження та електронні блокувальники, можуть бути використані для виявлення та запобігання перевантаженням. Проектування доріг і мостів з урахуванням великих навантажень сприятиме підвищенню їхньої міцності і тривалості служби. Залучення автомобілістів до усвідомлення наслідків перевантаження та до зобов'язань дотримуватися вагових норм є ще одним кроком у вирішенні питань осьових навантажень на дорожнє покриття.

Важливою є співпраця між державними органами, автомобілістами та іншими зацікавленими сторонами для розв'язання цієї проблеми та забезпечення довгострокової тривалості дорожньої інфраструктури.

Основні аспекти аналізу впливу осьових навантажень на автомобільні дороги включають етапи, відображені на рисунку 3.

Розвиток системи незалежного контролю якості в дорожній галузі включає в себе впровадження ряду принципів, які допоможуть забезпечити якість дорожніх робіт і підвищити безпеку дорожнього руху. Головні принципи, які варто враховувати:

1. Контроль якості має бути незалежним від виробника дорожніх робіт і будівельних компаній. Це означає, що інспекція і контроль якості повинні виконуватися сторонніми організаціями або спеціалістами, які не мають конфлікту інтересів і не залежать від підприємств, які виконують роботи.

2. Встановлення чітких стандартів і вимог до якості дорожніх робіт є важливим. Ці стандарти повинні бути відомими всім зацікавленим сторонам і строго дотримуватися.

3. Організації або індивідуальні фахівці, які здійснюють контроль якості, повинні бути або акредитовані або сертифіковані. Це допоможе забезпечити їхню компетентність та незалежність.

4. Система контролю якості повинна включати в себе постійний моніторинг дорожніх робіт на різних етапах будівництва. Це дозволить вчасно виявляти можливі дефекти і недоліки.



Рисунок 3 – Етапи проведення аналізу впливу осьових навантажень на автомобільні дороги  
Джерело: розроблено авторами

5. Результати контролю якості мають бути доступними громадськості і звітними перед відповідними органами влади. Це сприяє прозорості і відкритості в дорожній галузі.

6. Розвиток системи контролю якості повинен включати в себе вивчення та впровадження найкращих практик з інших країн і регіонів, де якість дорожніх робіт є високою.

7. За порушення стандартів і вимог до якості повинні передбачатися відповідні санкції та покарання.

8. Фахівці, які здійснюють контроль якості, повинні мати можливість постійного навчання та підвищення своєї кваліфікації.

Розвиток системи незалежного контролю якості в дорожній галузі є ключовим елементом забезпечення безпеки дорожнього руху та тривалості дорожньої

інфраструктури. Це також сприяє довірі громадськості до якості дорожніх робіт і виконання вимог до безпеки.

Контроль загальної ваги і навантаження на вісь вантажного автотранспорту є важливою складовою забезпечення безпеки на дорогах і довгострокової тривалості дорожньої інфраструктури. Для здійснення такого контролю застосовуються різні методи та інструменти, такі як вагові пости, електронні системи контролю, підземні вагові датчики.

Вагові пости розташовані на дорогах і використовуються для зважування транспортних засобів. Вони дозволяють визначити загальну вагу автомобіля і розподіл ваги на окремі осі. Вагові пости можуть бути постійними або тимчасовими, і вони перевіряють вантажні автомобілі на відповідність ваговим нормам.

Сучасні технології дозволяють встановлювати електронні системи контролю вантажу. Ці системи можуть вимірювати вагу автомобіля в режимі реального часу під час руху. Вони можуть бути вбудовані в дорожній покриття або встановлені на відстані від дороги.

Підземні вагові датчики встановлюються в дорожньому покритті та дозволяють вимірювати вагу транспортних засобів, не зупиняючись. Вони допомагають виявляти перевищення ваги на вісь і загальної ваги.

**Висновки:** 1. При проектуванні доріг для руху багатоколісних транспортних засобів та спеціалізованих автопоїздів із важкими причепами та платформами критично важливо орієнтувати розрахунки на найбільше еквівалентне колісне навантаження. Це дозволяє точно оцінити вплив таких транспортних засобів на дорожнє покриття. Замінюючи групу коліс еквівалентним навантаженням, можна врахувати особливості навантаження, що є важливим для забезпечення міцності та довговічності доріг, особливо в умовах одноразових чи нерегулярних проїздів великовагового транспорту.

2. Розрахунок на найбільше еквівалентне колісне навантаження є важливим для продовження терміну служби дорожніх покриттів, з огляду на сучасний транспорт, де великовагові автомобілі та спеціалізовані автопоїзди стають усе більш поширеними. Такий метод дозволяє розподілити навантаження рівномірніше, уникаючи концентрації напруги в одній точці. Крім того, врахування еквівалентного навантаження дозволяє включити динамічний вплив, що виникає під час руху, особливо на нерівній дорозі. Це особливо важливо, оскільки динамічні навантаження можуть значно підвищити ризик передчасного руйнування покриття, навіть якщо статичні навантаження залишаються в межах допустимого.

3. Включення еквівалентного колісного навантаження в розрахунки є важливим елементом підтримки транспортної інфраструктури в умовах зростаючих вимог до вантажних перевезень. Такий підхід дозволяє не лише правильно проектувати нові дороги, але й аналізувати стан існуючих, щоб оцінити їхню здатність витримувати проїзд великовагових транспортних засобів без необхідності частого ремонту чи реконструкції.

## Список літератури

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Чернай А. Є., Уманенко О. О., Монолій А. О., Притула С. І. Підвищення стійкості та керованості транспортного засобу шляхом удосконалення конструктивних параметрів підвіски. 2020.

2. Гриньків А. В., Аулін В. В., Головатий А. О., Лівіцький О. М., Дяченко В. О., Галінський Є. С. Технічна діагностика транспортних машин як основа стану кіберфізичної системи. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*. 2022. С. 165.
3. Поляков В. М., Білякович М. О., Разбойніков О. О., Іванушко О. М., Місько Є. М. Формування навантаження від автомобіля на дорожнє покриття за різної швидкості долаття нерівності. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 2023, № 113.2, С. 180–192.
4. Поляков В. М., Разбойніков О. О. Визначення рівнодіючої сил взаємодії автомобільного колеса з нерівною поверхнею дороги. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2017. Вип. 1(37). С. 329–338.
5. Разбойніков О. О. Поліпшення курсової стійкості легкового автомобіля при русі по нерівній дорозі : дис. канд. техн. наук : 05.22.02. Київ : НТУ, 2021. 214 с.
6. Ряпухін В. М. Обґрунтування розрахункового навантаження на магістральних дорогах України. *Вісник ХНАДУ*, 2019. Вип. 86. Т. II. С. 63–68.
7. Сергійчук А. А., Аулін В. В., Гриньків А. В., Цьонь О. П. Забезпечення належного контролю за технічним станом транспортних засобів. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції, 22–24 листопада 2023 р., м. Кропивницький*. С. 136–138.
8. Цьонь О. П., Ляшук О. Л., Рожко Н. Я., Плекан У. М. Моделювання шляхів підвищення безпеки дорожнього руху. *Збірник тез доповідей міжнар. наук.-практ. конф. присвяченої 90-річчю від дня народження проф. Рибак Т. І., Тернопіль, 29–30 вересня 2022 р. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 176.*
9. Lyashuk O., Levkovych M., Vovk Y., Gevko I., Stashkiv M., Liubomyr S., Pyndus Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*, 2023.
10. Rogatynskiy R. M., Lyashuk O. L., Hevko I. B., Horoshyn R. V., Shevchuk V. V. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 2023. Вип. 28. С. 115–122.
11. Sakhno V., Poliakov V., Lyashuk O., Murovanyi I., Stelmashchuk V., Onyschuk V., Tson O., Rozhko N. To the comparative evaluation of three-unit lorry convoys of the different component systems by maneuverability. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2023, 121, С. 189–201. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.121.12>.

## References

1. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Chernaĭ, A. E., Umanenko, O. O., Monolii, A. O., & Prytula, S. I. (2020). Improving the stability and controllability of the vehicle by improving the design parameters of the suspension. [in Ukrainian].
2. Hryniv, A. V., Aulin, V. V., Holovaty, A. O., Livitskyi, O. M., Diachenko, V. O., & Halinskyi, E. S. (2022). Technical diagnostics of vehicles as the basis of the cyber-physical system state. *Improving the reliability and efficiency of machines, processes, and systems*, 165. [in Ukrainian].
3. Poliakov, V. M., Biliakovich, M. O., Razboinikov, O. O., Ivanushko, O. M., & Misko, E. M. (2023). Formation of vehicle load on the road surface at different speeds of overcoming road unevenness. *Automobile Roads and Road Construction*, (113.2), 180–192. [in Ukrainian].
4. Poliakov, V. M., & Razboinikov, O. O. (2017). Determination of the resultant forces of interaction between a vehicle wheel and an uneven road surface. *Bulletin of the National Transport University. Series: Technical Sciences*, 1(37), 329–338. [in Ukrainian].
5. Razboinikov, O. O. (2021). Improving the directional stability of a passenger car when driving on uneven roads: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.22.02. Kyiv: NTU.
6. Riapukhin, V. M. (2019). Justification of calculated loads on highways in Ukraine. *Bulletin of KhNADU*, 86(II), 63–68. [in Ukrainian].
7. Serhiichuk, A. A., Aulin, V. V., Hryniv, A. V., & Ts'on', O. P. (2023). Ensuring proper control over the technical condition of vehicles. *Collection of materials from the International Scientific and Practical Conference*, Kropyvnytskyi, 136–138. [in Ukrainian].

8. Tson, O. P., Liashuk, O. L., Rozhko, N. Ya., & Plekan, U. M. (2022). Modeling ways to improve road traffic safety. *Collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference*, Ternopil: FOP Palianytsia V. A., 176. [in Ukrainian].
9. Lyashuk, O., Levkovich, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Liubomyr, S., & Pyndus, Y. (2023). The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*.
10. Rogatynskiy, R. M., Lyashuk, O. L., Hevko, I. B., Horoshyn, R. V., & Shevchuk, V. V. (2023). Model of vehicle movement on a curved track. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 28, 115–122.
11. Sakhno, V., Poliakov, V., Lyashuk, O., Murovanyi, I., Stelmashchuk, V., Onyschuk, V., Tson, O., & Rozhko, N. (2023). To the comparative evaluation of three-unit lorry convoys of the different component systems by maneuverability. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 121, 189–201. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.121.12>.

**Oleg Lyashuk**, Prof., DSc., **Uliana Plekan**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yurii Vovk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliya Rozhko**, Prof., DSc.

*Ternopil Ivan Pulu National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### **Analysis of the Impact of Axle Loads on the Condition of Roads**

The purpose of this study is to highlight the key issues related to the destructive impact of the mass of freight vehicles on Ukraine's highways. The paper examines the essence of axle loads, provides permissible standards for individual axles of freight vehicles, and analyzes the current composition of freight vehicles and their impact on road surfaces. It also reviews technical means and methods for controlling weight regulations, such as weigh stations, electronic control systems, and underground weigh sensors.

The issue of multi-axle vehicles, which are used to reduce the load on individual axles, is explored, but it is noted that these vehicles do not always solve the problem of excessive road wear. Multi-axle vehicles may formally meet regulatory standards, but they do not address the environmental impact or the increased risk of accidents. It is also important to consider the real operating conditions of roads, including traffic intensity and climate conditions, to ensure the longevity of road surfaces.

One of the key points discussed is the development of an independent quality control system in the road sector, which can help improve road conditions and enhance traffic safety. The paper proposes a step-by-step approach to analyzing the impact of axle loads on highways, which includes determining the design load, analyzing the actual condition of roads, and using modern technologies to monitor vehicle weight.

Special attention is given to the importance of accurately calculating the axle load of vehicles to ensure the long-term operation of roads. It is noted that exceeding permissible axle loads can lead to significant infrastructure repair costs, road surface destruction, and an increased risk of accidents. It is essential that transport infrastructure is designed to meet modern weight regulations and that freight carriers comply with vehicle weight limits.

**multi-wheeled vehicles, road surface, axle load, cargo vehicles, highways**

*Одержано (Received) 17.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 10.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 629.3.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.236-249](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.236-249)**О.В. Іванкова**, доц., канд. техн. наук, **О.А. Бурлака**, доц., канд. техн. наук*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua, oleksii.burlaka@pdau.edu.ua***В.Ю. Бартош**, директор*ТОВ Авто-Моторна Компанія, м. Полтава, Україна**e-mail: amksto01@gmail.com*

## Матеріали та технології для відновлення зношених поверхонь автомобільних деталей

Проведено дослідження зношених поверхонь колінчастих валів автомобільних двигунів. Проаналізовано закономірності утворення дефектів колінчастих валів двигунів вантажних автомобілів. З цією метою досліджено вибірку з 20 двигунів. Визначено які саме дефекти найбільше впливають на ресурс колінчастих валів. Проаналізували методи відновлення та вибрали оптимальний. Проведені дослідження використання електроіскрового нарощування, експерименти з нарощування шару на сталіні зразки.

Досліджені: залежність сумарного приросту катода від вмісту карбону та числа проходів електрода, визначено товщину нанесеного на поверхню деталі шару, твердість зразків з покриттям, міцність зчеплення нарощеного шару з основним. Визначили оптимальні матеріали для нарощування, а також параметри технологічного процесу.

Випробуваннями на міцність зчеплення нарощеного шару з основою встановлено високий (638,7 МПа) рівень міцності. На основі проведених випробувань встановили, що зразки сталі з нанесеним покриттям мають вищу твердість у порівнянні зі зразком після термічної обробки. Досліди показали що для електроіскрового нарощування зразків сталей 45Г, 40Х оптимальними електродні матеріали з вмістом карбону 1,0% Сті хрому 17,0% Сг.

**автомобіль, колінчастий вал, зношування, електроіскрове нарощування, міцність зчеплення, твердість**

**Постановка проблеми.** Повноцінний розвиток та конкурентоспроможність різних галузей економіки країни в значній мірі залежить від рівня ефективності транспортного комплексу. Саме автомобільний транспорт в сучасних умовах забезпечує раціональну організацію виробництва та транспортування продукції промисловості та аграрного виробництва [1, 2]. Існує суттєва залежність успішної діяльності сільськогосподарських виробників від якості експлуатації автомобілів.

Матеріали, з яких виготовляють деталі автомобілів, визначають: рівень технологічності в процесі виготовлення; надійність та довговічність в період експлуатації; економічність та ремонтнопридатність автомобіля.

Розробка і вдосконалення технологій відновлення поверхонь деталей була і залишається можливістю сповільнення дії зношування та руйнування деталей. Застосування якісних матеріалів з високими фізико-механічними властивостями для виготовлення деталей машин та удосконалення конструкції механізмів - основні шляхи підвищення якості деталей та трибологічних умов експлуатації спряжень.

Технологічність у виробництві, надійність і довговічність в експлуатації, а також ремонтнопридатність, і звичайно ж економічні показники усього життєвого циклу деталей машин визначаються матеріалом, з якого вони виготовлені.

Будь-який автомобіль можна охарактеризувати безліччю різних показників, зокрема: витрата палива, максимальна швидкість, норма викиду токсичних речовин та інші [3, 4].

Двигуни сучасних автомобілів стають потужнішими та більш економними за попередників. Їх форсують турбонаддувом, змінюють фази газорозподілу, тощо. Але, значна потужність двигуна при невеликому робочому об'ємі двигуна призводить до зниження його ресурсу мінімум на третину. Досягнення більшої потужності одночасно із підвищенням економічності та екологічності веде до ускладнення конструкції та надмірного навантаження деталей двигуна. Через те невідворотно знижується надійність роботи двигуна.

Певний час (термін експлуатації) двигун працює без збоїв, а потім втрачає свої характеристики, виходить з ладу. Тоді виникає необхідність проведення капітального ремонту. Наявність характерного стуку, зниження потужності двигуна, значне підвищення витрати пального та оливи можуть бути критеріями несправності двигуна і необхідності проведення капітального ремонту [5, 6].

Ресурс вузлів із встановленими в них відремонтованими деталями є дещо нижчим, ніж нових. Але, витрати на відновлення деталей автомобіля значно нижчі порівняно з виготовленням нових аналогічних деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням підвищення надійності деталей машин присвячено багато робіт видатних вчених. Над дослідженнями відновлення надійності колінчастих валів працювало і працює велика кількість науковців, а також практиків-інженерів. Вони аналізують і на практиці випробовують результати застосування тих чи інших способів відновлення [7, 8].

Для усунення більшості дефектів, розроблено поопераційну послідовність технологічних процесів і маршрути відновлення. Традиційно технологію ремонту колінчастих валів складають такі операції: очищення та миття, дефектація, ремонт центрувальних отворів, правка (рихтування) валу, наплавлення, чи напилення (посадочних місць, шліців, різьби та шпонкових пазів), проточування та шліфування, зміцнення гартуванням СВЧ з відпусканням, балансування валу, контроль якості.

Над розробкою технологій відновлення зношених поверхонь колінчастих валів успішно працювали такі науковці: Чорновол М.І., Скобло Т.С., Сідашенко А.І., Стороженко М.С., Аулін В.В., Марченко Д.Д. та інші. Досліджувались технологічні методи наплавлення (зварювання TIG) [10], високошвидкісного дугового напилення [11], газотермічні методи, зокрема, електродугового напилення [12], лазерного відновлення, термічного напилення [13], електроіскрового нарощування [14] та інші.

Технологій відновлення зношених деталей машин на сьогодні розроблено достатньо багато [8, 9]. Але, очевидно, ні один з них не вирішує комплексного завдання забезпечення якості обробки, ресурсозбереження та екологічності.

Оскільки більшість пошкоджень та несправностей колінчастих валів автомобільних двигунів виникає з причини зношування робочих поверхонь деталей у процесі їх експлуатації, то до цього часу актуальним залишається завдання ефективного й раціонального відновлення зношених поверхонь. Вибір методу та прийняття технології відновлення зношених поверхонь валів залежить від властивостей матеріалу деталей та способу їх виготовлення. У сучасному світі необхідною умовою стало також дотримання вимог щодо економічності технологічного процесу (ресурсозбереження) та екологічної безпеки для довкілля.

**Постановка завдання.** Мета: дослідити зноси поверхонь колінчастих валів автомобільних двигунів визначити які саме дефекти найбільше впливають на їх ресурс.

Вибрати оптимальний спосіб відновлення. Провести експерименти по електроіскровому нарощуванню.

Для цього потрібно вирішити завдання: вивчити рівень дефектів валу, які можливо відновити електроіскровим способом; визначити оптимальний матеріал та параметри технологічного процесу, а саме: залежність сумарного приросту катода від вмісту карбону та числа проходів електрода, товщину нанесеного на поверхню деталі шару, твердість зразків з покриттям, міцність зчеплення нарощеного шару з основним.

**Виклад основного матеріалу.** Ресурс дизельного автомобільного двигуна до капітального ремонту залежить переважно від стану кривошипно-шатунного механізму. Колінчастий вал є основною ланкою цього механізму. Він передає крутний момент і сприймає навантаження сил тиску газів та інерції мас, які обертаються та рухаються прямолінійно. Ці сили спричиняють виникнення у валах циклічних стискаючих і розтягуючих навантажень, а також обертальних та згинальних моментів.

Якщо ми говоримо про вибір матеріалу електрода, то вибір починається з аналізу фізико-механічних властивостей матеріалу, з якого виготовлена деталь. А також, необхідно розглянути вплив умов експлуатації деталі та рівень зношуваності деталі.

Колінчасті вали дизельних двигунів виготовляють зі сталі 45Г-50Г. Корінні та шатунні шийки обробляють струмами високої частоти (СВЧ) на глибину 2.5-6.5 мм до твердості HRC 46-60. Сучасний автопарк України наповнюють вантажівки провідних європейських виробників - DAF (особливо серій DAF XF та DAF CF) та MAN різних модифікацій [3, 4]. Колінчасті вали таких автомобілів виготовлені зі сталі SA-29 1045 (G13450), яка є аналогом сталі 45Г2 по діючих в даний час Українських стандартах (ДСТУ 7809:2015).

Хімічний склад таких сталей і термічний обробіток забезпечують високі механічні властивості, які є запорукою довговічності колінчастих валів. Але в процесі тривалої експлуатації колінчасті вали зношуються, отримують цілий ряд дефектів і можуть втратити роботоздатність.

Визначальний вплив на довговічність колінчастого валу мають: жорсткість валу та його опор, зміцнення галтелей та поверхонь шийок, залишковий прогин валу після правки, режими навантаження в експлуатації двигуна, якість мастила.

Вали автомобільних двигунів відновлюються у разі наявності зносів однієї або кількох робочих поверхонь. Характерними дефектами колінчастих валів є: деформації, тріщини та руйнування поверхонь, а також зноси і задири шийок.

Розглянемо основні з них. В результаті експлуатації двигунів внутрішнього згорання в небезпечних перерізах колінчастого валу виникають та накопичуються втомні пошкодження. Межа витривалості валу через це знижується на 20...25% від витривалості нового валу. Різний характер розподілу таких пошкоджень мають вали дизельних та карбюраторних двигунів. У валах карбюраторних двигунів вони накопичуються в центральній частині шийок у біля масляних каналів У дизелів - в зоні переходу галтелей у щок валу. Тому колінчасті вали дизелів руйнуються, в більшості випадків, по щоках через дію згинальних моментів. Колінвали карбюраторних двигунів можуть руйнуватись по шийках через дію обертаючих моментів.

Залежно від характеру дефектів та величини зносів деталей процеси відновлення відносять до двох основних груп: відновлення механічних пошкоджень деталей та відновлення зношених поверхонь деталей.

Стосовно колінчастих валів двигунів автомобілів, то до них висуваються підвищені вимоги щодо міцності та зносостійкості. В зв'язку з цим важливим є питання визначення ефективних методів їх ремонту.

Дослідження проводились на базі товариства з обмеженою відповідальністю «Авто-Моторна Компанія» (м. Полтава). Для оцінки наявності та повторюваності дефектів колінчастих валів двигунів нами було проаналізовано стан колінчастих валів 20 двигунів вантажних автомобілів, що надійшли в капітальний ремонт.

Після розбирання двигуна колінчаті вали розбирались (видалялися шпонки, заглушки і пробки з масляних каналів, підшипники з отвору у фланці і т.д.), ретельно очищалися, а потім дефектувались.

При дефектації ми вимірювали геометричні розміри, визначали рівень овальності шийок, а також перевіряли вали на наявність і розташування тріщин методом магнітної дефектоскопії (рис.1).



Рисунок 1 - Визначення геометричних розмірів поверхонь валу та виявлення тріщин

Джерело: розроблено авторами

Вали з тріщинами вважаються небезпечними і не допускаються до ремонту. Тобто, вибраковують вали, що мають тріщини: на галтелях шатунних та корінних шийок; на циліндричній поверхні шийок ближче 6 мм від торців щік; на краях отворів масляних каналів (при довжині тріщини понад 15 мм).

Дослідженнями колінчастих валів у процесі дефектації були виявлені такі дефекти: спрацювання шатунних шийок 95 % і корінних шийок 93,8 %, зноси шпонкового паза 45,5%, зноси отвору під направляючий штифт 15 %, вигин валу 10 %, і тріщини в галтелях та на шийках 6,5 % (рис. 2). Тобто, переважна кількість досліджуваних колінчастих валів мали зношені поверхні шатунних та корінних шийок.

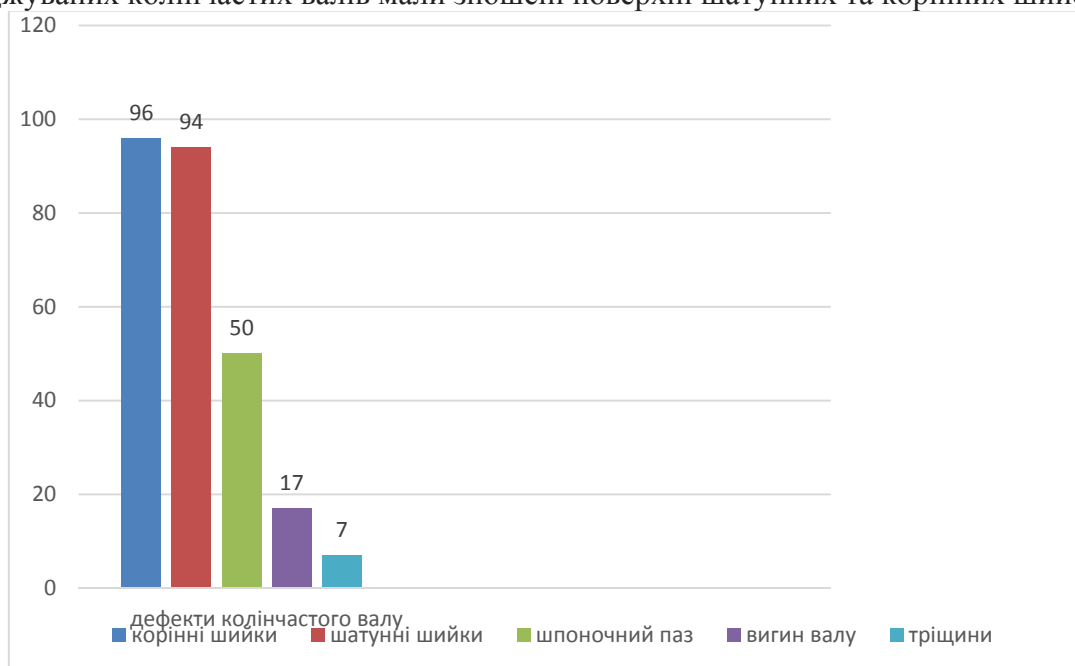


Рисунок 2 - Повторюваність дефектів колінчастих валів

Джерело: розроблено авторами

Основним методом ремонту колінчастих валів являється ремонт на ремонтний розмір, тобто, перешліфування зношеної шийки до ремонтного розміру (рис.3)

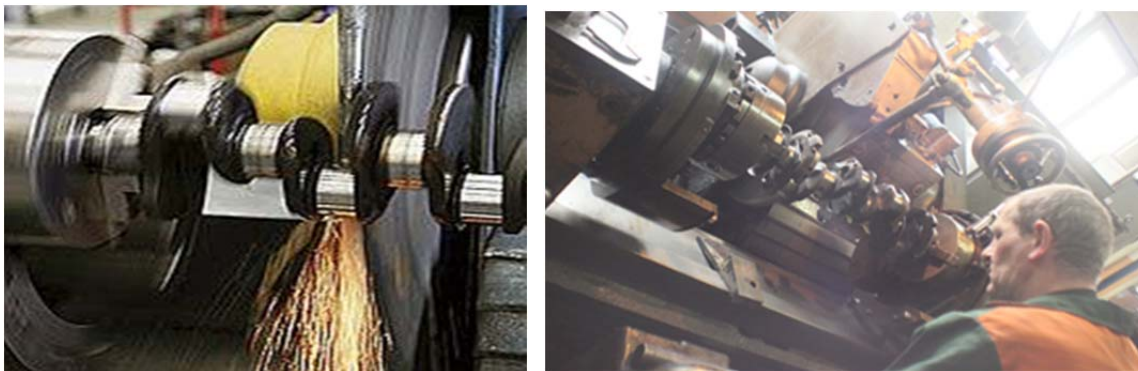


Рисунок 3 – Шліфування шийки колінчастого валу

*Джерело: розроблено авторами*

Розглянемо переваги та недоліки деяких методів відновлення деталей на номінальний розмір. На нашу думку, переваги мають такі технологічні процеси, які не спричиняють високотемпературного впливу на матеріал відновлюваної деталі. Термічний вплив на поверхню деталей викликає утворення в них значних залишкових напружень у результаті нерівномірного розподілу тепла по перерізу та неоднакової зміни об'єму різних зон термічного впливу (структурні напруження). Через це у наплавленому шарі виникають напруження стиснення, а у серцевині – розтягуючі напруження [10, 11].

Процесами, які не роблять вплив високої температури на метал відновлюваної деталі є газотермічні методи, а саме електродугова металізація, а також електроіскрове нарощування.

При ремонті двигунів (колінчастих валів) РАССАР МХ 265, які стоять на автомобілях DAF МХ 265, основною технологією відновлення прийняте ремонтне наплавлення, яке було запропоноване компанією Castolin Eutectic [9].

Суть електродугового наплення полягає у тому, що в спеціальному пристрої - металізаторі електрична дуга розплавляє присадний метал, потім потоком стисненого повітря з великою швидкістю він направляє на поверхню відновлюваної деталі [8, 12]. Завдяки можливості застосування як суцільних так і порошкових дротів, дозволяє отримувати покриття високої якості

Електродугова металізація характеризується незначним тепловим впливом на поверхню оброблюваної деталі і значними швидкостями охолодження. В результаті, зона термічного впливу (ЗТВ) незначна, отже поверхня деталі нагрівається незначно. Тому не виникає утворення внутрішніх напружень матеріалу деталі та покриття. Це безперечно є значною перевагою. Але, дослідження виявили доволі суттєві недоліки, основний з яких невисока міцність зчеплення покриття з основою.

Одним із методів поверхневої обробки деталей машин концентрованими потоками енергії є електроіскрове нарощування. Електроіскрова обробка має найбільшу концентрацію енергії в зоні нагріву [16].

Суть методу електроіскрового нарощування у тому, що під впливом імпульсних електричних розрядів у газовому середовищі, відбувається ерозійне руйнування матеріалу електродів (анодів), та перенесення та відкладення на поверхні деталі-катода частинок їх металу [17, 18].

Електроіскрове легування дає нам можливість моделювати практично усі види покриттів при виготовленні або при відновленні деталей.

Імпульсні потоки з частинками матеріалу дають можливість створення шару покриття з різних металевих та керамічних матеріалів. Велика кількість теоретичних та практичних досліджень, результати яких використовуються при виготовленні та відновленні деталей машин: від ракето- і літакобудування до сільського господарства. Наукові дослідження, присвячені вивченню структури та властивостей покриттів, отриманих у процесі електроіскрового легування містять дані про значну міцність зчеплення покриття з основою.

Використання даної технології має також і певні недоліки: це висока шорсткість, низька продуктивність та обмеження товщини шару покриття.

Такі науковці, як Лузан С.О., Сідашенко О.І., Козак Ф. В., Прунько І. Б., Іщенко Є. В., Скобло Т. С., Рыбалко Н. Н., Тихонов А. В., Мартыненко А. Д. та інші ґрунтовно досліджували питання застосування електроіскрового нарощування (ЕІЛ) для відновлення зношених поверхонь та їх зміцнення. В науковій літературі існує велика кількість публікації досліджень по відновленню зношених поверхонь деталей електроіскровим нарощуванням з наступним аналізом зносостійкості та твердості отриманих покриттів. Але даних стосовно досліджень відповідних покриттів, сформованих методом ЕІЛ недостатньо. Тому дослідження формування покриттів на сталі 45Г2 методом ЕІЛ електродами з різних матеріалів є актуальною задачею.

Використання електроіскрового нарощування для відновлення зношених деталей дає не тільки відновлення їх геометричних розмірів, але і змінює фізико-механічні властивості поверхні, покращуючи їх експлуатаційні характеристики.

Характеристики процесу електроіскрового легування залежать від: матеріалу деталі; матеріалу електрода; режимів обробки.

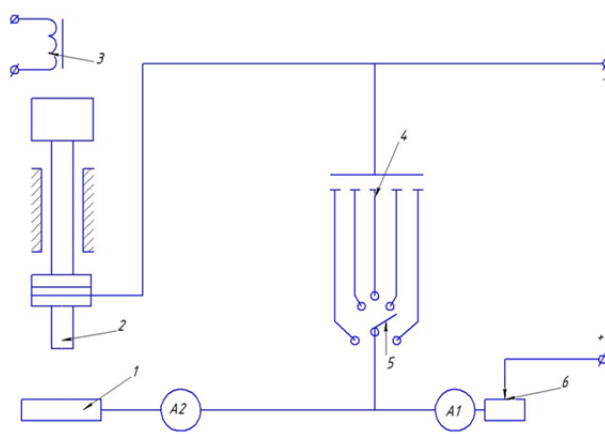
Можемо стверджувати, що застосування одного чи іншого способу відновлення зношених деталей машин залежить не тільки від характеру дефектів, а також і від матеріалу та способу виготовлення деталі. Отже, завдання можливо вирішувати тільки комплексним підходом. А комплексний підхід включає й вибір матеріалу для нарощування зношених поверхонь.

Нами проведені дослідження процесу електроіскрового нарощування.

Експерименти проводились з використанням експериментальної установки, основним технологічним вузлом якої було обладнання для електроіскрового нарощування БІГ - 4.



а)



б)

1 - оброблювана деталь; 2 - електрод; 3 - вібратор; 4-конденсатор; 5-перемикач; 6 - реостат;  
А<sub>1</sub> - амперметр мережі живлення; А<sub>2</sub> - амперметр розрядного ланцюга

Рисунок 4: а) - Установка для електроіскрового відновлення БІГ - 4; б) - Схема електроіскрової установки  
Джерело: розроблено на підставі [13]

Вибір матеріалу електроду [15, 17, 19] залежить від матеріалу відновлюваної деталі та від вимог до властивостей поверхні. Хімічний склад аноду визначає експлуатаційні показники: рівень фізико-механічних властивостей (міцність, твердість та інші), зносостійкість, міцність зчеплення нарощеного шару з поверхнею деталі, схильність до викришування та інші. Беручи це до уваги, ми повинні розглянути взаємозв'язок сумарного приросту деталі (катода) від енергії імпульсу обробки та матеріалу аноду (електроду).

Найбільша якість нарощеного шару досягається при умові, коли застосовуються матеріали для анода і катода, коефіцієнти лінійного розширення яких рівні.

Результати аналізу наукової апріорної інформації, експериментальні дослідження підтверджують тезу про те, що найвища зносостійкість може бути досягнута, якщо робити покриття легуваними матеріалами, особливо - хромистими сплавами. Але ж, анод з таких матеріалів характеризується також і підвищеною ерозійною стійкістю. Колективом науковців [16] на чолі з академіком Скобло Т.С. була здійснена оцінка ефективності та якості покриттів хромистими сплавами. Для експериментів брали як анод 12 легуваних сплавів, які відрізнялися вмістом хрому (Cr – від 10% до 30%) і вуглецю (C - від 1,0% до 2,5 %) з метою, оцінки ролі карбідоутворення, а також оцінки можливості утворення різних зміцнюючих фаз при формуванні покриття.

Так як масоперенос металу з аноду на катод визначається матеріалом анода, числом проходів електроду і енергією імпульсу, то для виявлення впливу цих факторів був застосований метод планування експерименту  $2^4$ . У результаті, отримали висновки: максимальний приріст катода  $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$  отримали при енергії імпульсу на верхній межі значень  $E=3,4$ Дж, та при концентрації вуглецю і хрому в аноді на – нижньому.

Тому, ґрунтуючись на результатах цих досліджень, ми провели дослідження залежності сумарного приросту катода (деталі) від матеріалу аноду (електроду) та енергії імпульсу обробки (E). Для досліджень обрали сталі з різним вмістом вуглецю та хрому (табл. 1). Нарощування робили за три проходи електродом зі сплав 100X17 (17,0% Cr і 1,0% C).

Обробку проводили за двома режимами:  $E_1=0,9$ Дж;  $E_2=3,5$ Дж. Було встановлено, що із підвищенням енергії імпульсів від  $E_1$  до  $E_2$  приріст катода  $\sum_{i=1}^n \Delta k$  також збільшується для всіх матеріалів.

Сумарна ерозія анода  $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$  і приріст катода  $\sum_{i=1}^n \Delta k$  при електроерозійній обробці підвищуються із підвищенням вмісту карбону у зразках. У низьковуглецевих сталях - найнижча, у середньовуглецевих - вище. Підвищення сумарної ерозії анода найбільш суттєве при найменших значеннях енергії імпульсу ( $E=0,9$ Дж).

Таблиця 1 - Сумарна ерозія анода і приріст катода при електроіскровій обробці конструкційних сталей

| Матеріал катода | Енергія імпульсу, E, Дж | Приріст катода, $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$ , г/см <sup>2</sup> | Ерозія анода, $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$ , г/см <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Ст. 3           | 0,9                     | 0,5                                                           | 1,5                                                         |
|                 | 3,5                     | 1,2                                                           | 3,0                                                         |
| 45Г             | 0,9                     | 0,5                                                           | 1,5                                                         |
|                 | 3,5                     | 1,25                                                          | 3,0                                                         |
| 40Х             | 0,9                     | 0,6                                                           | 1,4                                                         |
|                 | 3,5                     | 1,3                                                           | 3,0                                                         |

Джерело: розроблено авторами

Підвищення ерозії аноду  $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$  не перевищує 20%, а – приріст катоду  $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$  досягає майже 35%. Із підвищенням енергії імпульсу від 0,9 до 3,4Дж.

Приріст катода  $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$  в залежності від матеріалу зростає в 2,17–2,5 рази, ерозія анода  $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$  в 2,00–2,14 рази. Обробка вибраних сталей з високою енергією імпульса ( $E=3,4$  Дж) менше впливає на  $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$  і на  $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$ .

Із збільшенням концентрації карбону зростає доля крихкої карбідної фази, що сприяє інтенсивному росту ерозії анода [17, 18]. На основі цих досліджень підтверджується, що і в цьому випадку масоперенос металу з аноду на катод визначається матеріалом анода, числом проходів електрода і енергією імпульсу.

Нами проведено дослідження залежності сумарного приросту катода від кількості проходів електрода (анода) та його хімічного складу при нанесенні покриття. Для цього використали рівняння регресії [16]:

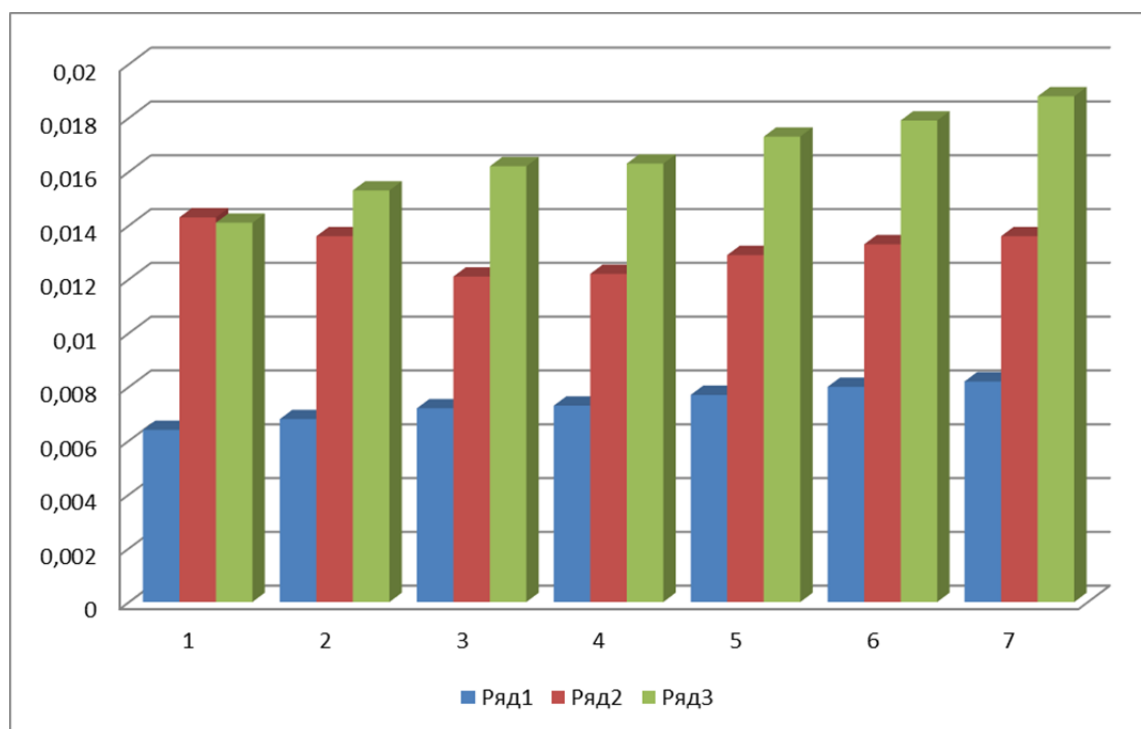
$$\sum \Delta k = 1.11 \frac{\sqrt{C \cdot E_u}}{C r^2} \cdot n - 0.02 \frac{E_u \cdot \sqrt{C}}{C_r} \cdot n^2, \quad (1)$$

де  $C, C_r$  - вміст карбону і хрому в матеріалі електрода відповідно, %;

$n$  - число проходів електрода;

$E_u$  - значення енергії імпульсу обробки, Дж.

Приймаємо вміст  $C_r=17\%$  та величину енергії імпульсу  $E_u=0,22$  Дж та отримуємо залежність (рис. 5).



Ряд1 – 1 прохід електрода, ряд 2 – 2 проходи електрода, ряд 3 – 3 проходи електрода; 1 – 1,5%С, 2 – 1,7%С, 3 – 1,9%С, 4 – 2%С, 5 – 2,2%С, 6 – 2,4%С, 7 – 2,5%С.

Рисунок 5 – Залежність сумарного приросту катода від вмісту карбону та числа проходів електрода  
Джерело: розроблено авторами

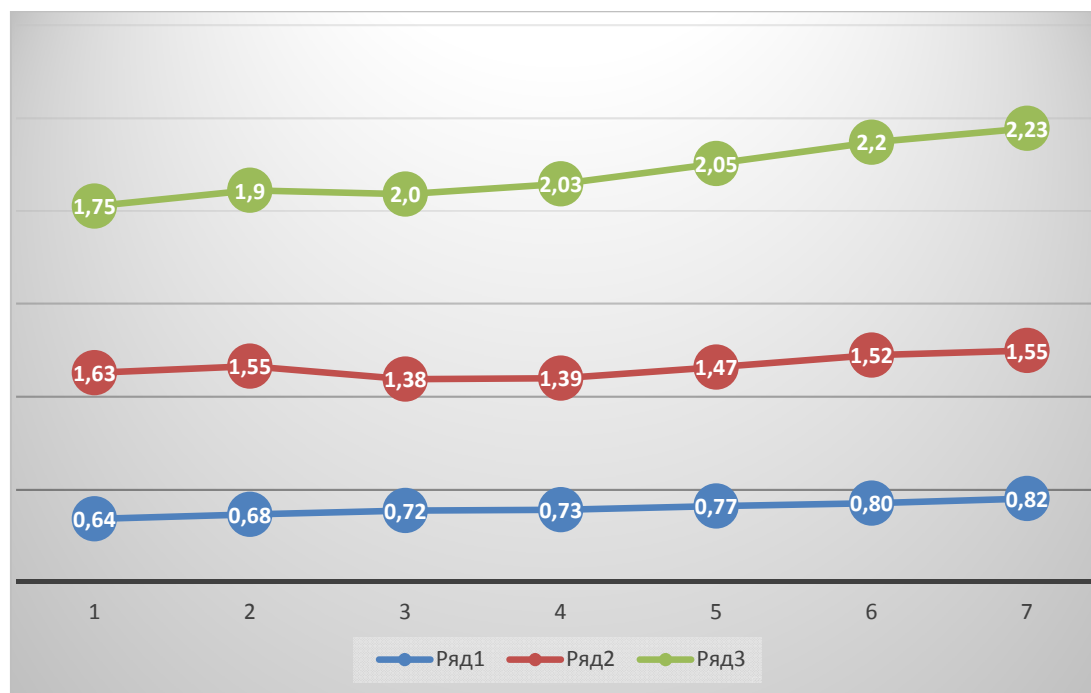
При збільшенні числа проходів електрода вміст хімічних елементів анода в шарі практично відсутній [17, 20]. Із збільшенням кількості проходів електрода зростає пористість покриття.

При 1-3 проходах електроду формується дисперсна структура на основі складових катода і анода. При великій енергії імпульсів (понад  $E = 3,4 \text{ Дж}$ ) при наступних проходах електроду формуються пори, що спричиняє крихкість покриття. При збільшенні числа проходів електроду хімічні елементи катода в шарі майже відсутні. Натомість починається кристалізація оксидної фази та зростає кількість карбідних включень, що пов'язано із збільшенням у шарі частки карбідоутворюючого елементу анода і зменшенням матричної фази катода.

Величина сумарного приросту катода  $\sum \Delta k$  (Y), дозволяє визначити товщину шару  $h$  (мкм), що наноситься на поверхню деталі [16]:

$$h = \frac{\beta \cdot \sum \Delta k}{\rho}, \quad (2)$$

де  $\beta$  - поправочний коефіцієнт, що враховує несучільність покриття та наявність пор:  
 $\beta \geq 0,78$  при  $n=1$ ,  $\beta = 0,89$  при  $n=2$ ,  $\beta = 0,97$  при  $n=3$ ,  
 $\rho$  - питома вага матеріалу електроду,  $\text{г/см}^3$ .



Ряд1 –  $h$  за 1 проход електроду, ряд 2 –  $h$  за 2 проходи електроду, ряд 3 –  $h$  за 3 проходи електроду

Рисунок 6 – Зміна товщини шару покриття

Джерело: розроблено авторами

Проведені дослідження (рис. 5 і 6) показують, що використання як електродів матеріалів з вмістом карбону 1,5-2,5 % та хрому 10,0-25,0% не доцільно робити більше 3 проходів електроду, так як забезпечується приріст катода, який забезпечує достатню товщину покриття.

Твердість зразків з покриттям й контрольного зразка без покриття були визначені за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М при навантаженні 0,98 Н відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007. Контрольний зразок із сталі 45Г загартували при

температурі 970 °С и відпустили при температурі 540 °С протягом 2 годин. Результати по твердості наведено у вигляді діаграми (рис. 7)

На основі проведених випробувань встановили, що зразки сталі з нанесеним покриттям мають вищу твердість у порівнянні зі зразком після термічної обробки.

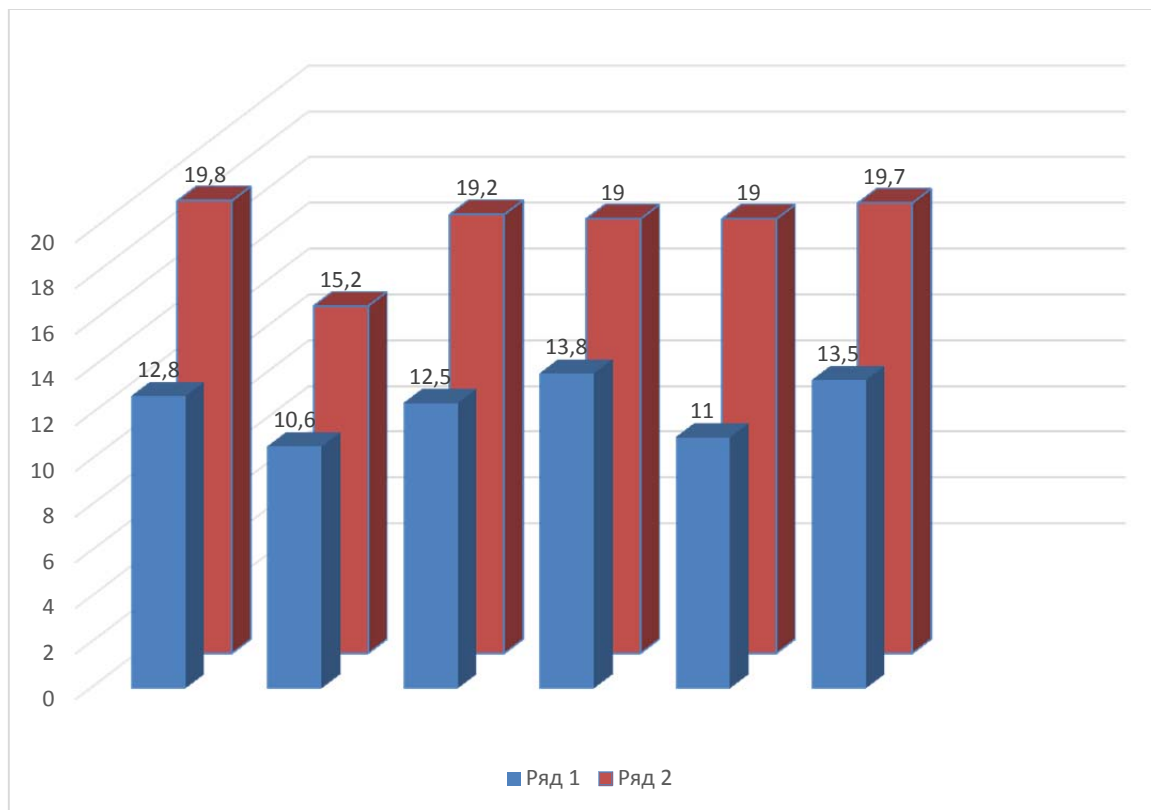


Рисунок 7 – Твердість поверхні зразків ряд1 – контрольного зразка з термообробкою; ряд 2 – електроіскрового покриття

Джерело: розроблено авторами

Міцність зчеплення нарощеного шару з основним ми досліджували за методикою, розробленою А.П. Гуляєвим та Н.Т. Гудцовим [18]. Оцінку рівня міцності зчеплення провели при навантаженні на індентор  $P=50$ .

Так як відшаровування нанесеного шару від матеріалу деталі не відбулось, то вважаємо, що міцність зчеплення не може бути меншою, ніж величина, визначена за залежністю:

$$\sigma = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

де  $P$  – навантаження, прикладене до алмазного наконечника, кгс;

$d$  – середнє значення довжин діагоналей відтиска, мм;

1,854 – коефіцієнт, який пов'язує значення довжини діагоналі до площі відтиска

Оцінюємо міцність зчеплення за формулою (3). Значення міцності зчеплення нарощеного металу з основним матеріалом деталі приводимо у вигляді діаграми (рис.8).



Рисунок 8 - Рівень міцності зчеплення нарощеного шару з поверхнею деталі

Джерело: розроблено авторами

Отже, результати випробувань свідчать про те, що зразки після електроіскрового нарощування електродом мають високий рівень міцності зчеплення покриття з основою мають

#### Висновки:

1. Досліджено зноси поверхонь колінчастих валів автомобільних двигунів. Більшість колінчастих валів, які надійшли у капітальний ремонт мали зноси шатунних (95%) та корінних шийок (93,8%). Усунення цих дефектів можливе методом електроіскрового нарощування.

2. Визначено оптимальний склад електроду для електроіскрового нарощування – сплав 100X17 (17,0% Cr і 1,0%С).

3. Результати експериментів з електроіскрового нарощування показують:

- при нанесенні покриття на зразки зі сталей 45Г і 40Х приріст катода збільшується із підвищенням енергії імпульсів, а саме: із підвищенням енергії імпульсу від 0,9 до 3,4Дж приріст катоду досягає майже 35%;

- три проходи електроду забезпечують достатні приріст катода та товщину покриття, яка сягає 2,00 мм;

- зразки сталі з нанесеним покриттям визначеним сплавом мають вищу твердість у порівнянні зі зразком після термічної обробки та високий (638,7 МПа) рівень міцності зчеплення нарощеного шару з основою.

4. Підтверджено можливість використання даного методу на підприємствах технічного сервісу для підвищення довговічності відновлених деталей.

Тому, дослідження по розробці технології відновлення конкретних деталей техніки методом електроіскрового нарощування, є досі актуальною задачею і потребує продовження досліджень.

#### Список літератури

1. Комчатних О.В., Петровська С.І., Редько Н.О. Сучасний стан та перспективи розвитку транспортної інфраструктури в Україні. *Причорноморські економічні студії. Економічний науково-практичний журнал*. 2021. №64. С. 11-16. <https://doi.org/10.32843/bses.64-2>
2. Multimodal freight transportation planning: A literature review/ Steadie Seifi M. at al. *European Journal of Operational Research*. 2014. No233(1). P.1–15.

3. Марченко А.П., Парсаданов І.В., Строков О.П. Двигуни внутрішнього згоряння і навколишнє середовище. *Загальні проблеми двигунобудування*. № 2, 2022. С.3-12. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01
4. Двигун DAF XF105 з 2006 р. Загальна інформація. Монолит.укр: веб-сайт. URL: <https://monolith.in.ua/dvigatel-daf-xf105/> (дата звернення: 04/02/2024).
5. 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 с.-г. техніки*. Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.163-164.
6. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів./ Буряк М.В. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту* No1(15), 2022. С.11-16. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>
7. 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.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. 370с.
8. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. / Іванкова О.В. та ін. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 283–292. doi: 10.31210/visnyk 2020.04.36
9. Our technologies to best serve you. *Eutectic Castolin* URL: <https://www.castolin.com>. (дата звернення: 27.06.2024)
10. O. Chivu Virlean, C. Rontescu, D. Cicic, M. Vasile, "Reconditioning of Crankshaft in the Automotive Industry by Using TIG Welding", *Advanced Materials Research*, Vol. 1111, p. 43, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.43>
11. Tian, H., Wang, C., Guo, M., Wei, S., Liang, X., Xu, B. High velocity arc spraying remanufacture process and thermal control for engine crankshaft (2017) *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*, 42 (12), pp. 117-121. doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2017.12.024 [http://www.eastview.com/peri/product.asp?sku=P33299&active\\_tab=4](http://www.eastview.com/peri/product.asp?sku=P33299&active_tab=4)
12. Дослідження відновлення корпусних деталей автомобільних двигунів методом електродугової металізації. Іванкова О.В., Бурлака О.А. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч.І DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1) С. 127-134.
13. Ding S., Ma G., Chen S., He P., Wang Y., Wang H., Xu B. Research State on Heat Accumulation Behavior and Temperature Control in Thermal Spraying Forming Process. (2019) *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 33 (11), pp. 3644 – 3653. DOI: 10.11896/cldb.18110093
14. Аналіз способів виготовлення, зміцнення і відновлення лап культиватора / Скобло Т. С. та ін. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 60-85
15. Гринь О. Г., Трембач Б. О., Трембач І. О. Сучасні матеріали для підвищення зносостійкості деталей машин наплавленням при гідроабразивному зносі. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. № 2 (44), 2018. С. 41-46.
16. Підвищення якості покриттів нанесених електроіскровим методом / Скобло Т. С. та ін. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства: збірник наукових праць / ХДТУСГ*. Вип. 23: *Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні*. Харків: ХДТУСГ 2004. С. 191-198.
17. Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів. Стороженко М.С. та ін. *Автоматичне зварювання*, №10, 2020.с. 21-25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.04>
18. Marchenko D. D., Matvyeyeva K. S. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospray Coatings. *Problems of Tribology* 28.1/107. 2023. P. 65-72.
19. Дем'янчук Я. М., Войцехівська Т. Й., Сумер А. Р. Вплив хімічного складу електродів для електроіскрового легування на трибологічну поведінку штоків нафтових насосів. *Наукові нотатки*. 2015. № 49. С. 47-50.
20. Оптимізація процесу нанесення електроіскрових покриттів при зміцненні автомобільних деталей типу "вал" / Козак Ф. В., Прунько І. Б., Феденько В. Я., Гладун М. Р./*Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу. Нафтогазова енергетика* 2023. № 2(40) ISSN 1993–9868 print ISSN 2415–3109 online УДК 621.789 DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-7 2

## References

1. Komchatnykh, O.V., Petrovs'ka, S.I. & Red'ko, N.O. (2021). Suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku transportnoyi infrastruktury v Ukraini. [The current state and prospects for the development of transport

- infrastructure in Ukraine] *Prychornomors'ki ekonomichni studiyi. Ekonomichnyy naukovo-praktychnyy zhurnal*. №64. S. 11-16. <https://doi.org/10.32843/bses.64-2> [in Ukrainian].
2. Multimodal freight transportation planning: A literature review. 2014./ Steadie Seifi M. et al. *European Journal of Operational Research*. No233(1). P.1–15. [in English].
  3. Marchenko, A.P., Parsadanov, I.V., & Stokov, O.P. (2022). Dvyhuny vnutrishn'oho z-horyannya i navkolyshnye seredovyshe. [Internal combustion engines and the environment]. *Zahal'ni problemy dvyhunobuduvannya*. № 2, S.3-12. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01 [in Ukrainian].
  4. Dvyhun DAF XF105 z 2006 r. Zahal'na informatsiia. Monolyt.ukr: veb-sajt [DAF XF105 engine from 2006. General information. Monolyt.ukr: website]. Retrieved from: <https://monolith.in.ua/dvigatel-daf-xf105/> [in Ukrainian].
  5. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., & Livits'kyi, O.M. (2015) Pidvyshchennya nadiynosti mobil'noyi ta avtotransportnoyi tekhniky sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva na osnovi diahnostryky yikh stanu. [Increasing the reliability of mobile and motor vehicles of agricultural production on the basis of diagnostics of their condition] *Problemy konstruyuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsiyi s.-h. tekhniky. Materialy X Mizhnar. nauk.-prakt. konf. Kirovohrad: KNTU*. S.163-164. [in Ukrainian].
  6. Buryak, M.V. et al. (2022). Otsinka dovhovichnosti metalokonstruktсий avtotransportnykh zasobiv. [Assessment of durability of metal structures of motor vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu* No1(15) S.11-16. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>. [in Ukrainian].
  7. Aulin, V.V., Holub, D.V., Hryn'kiv, A.V., & Lysenko, S.V. (2017). *Metodolohichni i teoretychni osnovy zabezpechennya ta pidvyshchennya nadiynosti funktsionuvannya avtomobil'nykh transportnykh system: monohrafiia* [Methodological and theoretical foundations of ensuring and improving the reliability of the functioning of automobile transport systems: monograph]. Kropyvnyts'kyi: Vydavets' «KOD». 370s. [in Ukrainian].
  8. Ivankova, O.V. et al. (2020). Doslidzhennia metodiv vidnovlennia znoshenykh detalej sil's'kohospodars'koi tekhniky [Research of methods of restoration of worn parts of agricultural machinery]. *Visnyk PDAA - PDAA Bulletin*, 4, 283-292 [in Ukrainian].
  9. Our technologies to best serve you. *Eutectic Castolin*. URL: <https://www.castolin.com>. (date of access: 27/06/2024). [in English].
  10. O. Chivu Virlean, C. Rontescu, D. Cicic, M. Vasile, (2015). Reconditioning of Crankshaft in the Automotive Industry by Using TIG Welding, *Advanced Materials Research*, Vol. 1111, p. 43. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.43> [in English].
  11. Tian, H., Wang, C., Guo, M., Wei, S., Liang, X., Xu, B. (2017) High velocity arc spraying remanufacture process and thermal control for engine crankshaft. *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*, 42 (12), pp. 117-121. doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2017.12.024 [http://www.eastview.com/peri/product.asp?sku=P33299&active\\_tab=4](http://www.eastview.com/peri/product.asp?sku=P33299&active_tab=4) [in English].
  12. Ivankova, O.V., Burlaka, O.A. (2024). Doslidzhennya vidnovlennya korpusnykh detaley avtomobil'nykh dvyhuniv metodom elektroduhovoyi metalizatsiyi. [Research on the restoration of body parts of automobile engines by the method of electric arc metallization]. *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky*. Vyp. 9(40), ch.1. S. 127-134.: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1). [in Ukrainian].
  13. Ding S., Ma G., Chen S., He P., Wang Y., Wang H., Xu B. (2019). Research State on Heat Accumulation Behavior and Temperature Control in Thermal Spraying Forming Process. *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 33 (11), pp. 3644 – 3653. DOI: 10.11896/cldb.18110093 [in English].
  14. Skoblo, T. S. et al. (2019). Analiz sposobiv vyhotovlennya, zmitsnennya i vidnovlennya lap kul'tyvatora. [Analysis of methods of manufacturing, strengthening and restoration of cultivator paws]. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv - Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes*. No. 15. P. 60-85. [in Ukrainian].
  15. Hryn', O. H., Trembach, B. O., Trembach, I. O. (2018). Suchasni materialy dlya pidvyshchennya znosostiysti detaley mashyn naplavlenniam pry hidroabrazynomu znosi. [Modern materials for increasing the wear resistance of machine parts by surfacing during hydroabrasive wear]. *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi*. № 2 (44), S. 41-46. [in Ukrainian].
  16. Skoblo, T. S. et al. (2004). Pidvyshchennya yakosti pokryttiv nanesennkh elektroiskrovym metodom. [Improving the quality of coatings applied by the electrospark method]. *Visnyk Kharkivs'koho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu sil's'koho hospodarstva: zbirnyk naukovykh prats': Tekhnichnyy servis APK, tekhnika ta tekhnolohiyi u sil's'kohospodars'komu mashynobuduvanni - Bulletin of the Kharkiv State Technical University of Agriculture: collection of scientific works / KhDTUSG*. Vol. 23. 191-198. Kharkiv: KHDTSU. [in Ukrainian].
  17. Storozhenko, M.S. et al. (2020). Rozrobka tekhnolohiy i materialiv dlya elektroiskrovoho nanesennya pokryttiv z metoyu pidvyshchennya terminu ekspluatatsiyi i nadiynosti detaley tekhnolohichnogo i

- enerhetychnoho obladnannya ta instrumentiv. [Development of technologies and materials for electrospark coating in order to increase the service life and reliability of parts of technological and energy equipment and tools]. *Avtomatychnye zvaryuvannya-Automatic welding*, 10, 21-25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.04>. [in Ukrainian].
18. Marchenko, D. D. & Matvyeyeva, K. S. (2023). Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. [Development of technologies and materials for electrospark coating in order to increase the service life and reliability of parts of technological and energy equipment and tools]. *Problems of Tribology*, 28.1/107, 65-72. [in Ukrainian].
19. Dem"yanchuk, YA. M. & Voytsekhivs'ka, T. Y., & Sumer, A. R. (2015). Vplyv khimichnoho skladu elektrodov dlya elektroiskrovoho lehuвання na trybolohichnu povedinku shtokiv naftovykh nasosiv. [Influence of the chemical composition of electrodes for electrospark alloying on the tribological behavior of oil pump rods]. *Naukovi notatky - Scientific notes*, 49, 47-50. [in Ukrainian].
20. Kozak F. V. et al. (2023). Optymizatsiya protsesu nanesennya elektroiskrovyykh pokryttiv pry zmitsnenni avtomobil'nykh detaley typu "val". [Optimization of the process of applying electrospark coatings during strengthening of automobile parts of the "shaft" type]. *Materialy, konstruktsiyi ta obladnannya ob'yektiv naftohazovoho kompleksu. Naftohazova enerhetyka - Materials, constructions and equipment of oil and gas complex objects. Oil and gas energy*, № 2(40), 66-72. DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-72. [in Ukrainian].

**Olena Ivankova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Alexei Burlaka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine*

**Vitaly Bartosh**, director

*Auto-Motor Company LLC, Poltava, Ukraine*

### **Materials and Technologies for Restoration of Worn Surfaces of Automobile Parts**

The materials from which car parts are made determine: the level of manufacturability in the manufacturing process; reliability and durability during operation; economy and maintainability of the car. The **purpose** of the article. To study the level of defects of crankshafts of automobile engines, to analyze methods of restoration and to choose the optimal one. To conduct experiments on the use of electric spark build-up, to determine the optimal materials for build-up, as well as the parameters of the technological process.

The regularities of the formation of defects in the crankshafts of truck engines have been analyzed. A sample of 20 engines was studied. It has been determined which defects have the greatest effect on the service life of crankshafts. Recovery methods were analyzed and the optimal one was selected. Conducted research on the use of electrospark build-up, experiments on layer build-up on steel samples. The following were investigated: the dependence of the total growth of the cathode on the carbon content and the number of electrode passes, the thickness of the layer applied to the surface of the part, the hardness of the coated samples, and the adhesion strength of the built-up layer to the main one were determined. We determined the optimal materials for building up, as well as the parameters of the technological process. A high (638.7 MPa) level of strength was established by tests on the adhesion strength of the built-up layer to the base. On the basis of the conducted tests, it was established that the steel samples with the applied coating have a higher hardness compared to the sample after heat treatment. Experiments have shown that electrode materials with a carbon content of 1.0-2.5% and chromium content of 10.0-25.0% are optimal for electrospark build-up of 45G, 40X steel samples.

**Conclusions.** Most of the crankshafts that were overhauled had worn connecting rods (95%) and main journals (93.8%). Elimination of these defects is possible by applying a coating using the electrospark build-up method. Experiments on the dependence of the total growth of the cathode and the thickness of the coating on the chemical composition of the anode and the number of electrode passes when coating samples made of 45G and 40X steels showed that the growth of the cathode increases with increasing pulse energy. It was established that when using electrodes with a carbon content of 1.5-2.5% and chromium content of 10.0-25.0%, it is not advisable to make more than 3 passes of the electrode, since 3 passes provide sufficient growth of the cathode and coating thickness. It was established that the steel samples with the applied coating have a higher hardness compared to the sample after heat treatment and a high (638.7 MPa) level of adhesion strength of the built-up layer to the base. The possibility of using this method at technical service enterprises to increase the durability and reliability of parts has been confirmed. Therefore, research on the development of the technology for the restoration of specific parts of the equipment by the method of electrospark build-up is still an actual task and requires continued research.

**car, crankshaft, defects, spark build-up, clutch strength, hardness**

*Одержано (Received) 18.04.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.250-260](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.250-260)

**В.В. Аулін**, проф., д.-р тех. наук, **О.В. Кузик**, доц., канд. техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **І.В. Жилова**, асист.

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

## Механізми внутрішнього та зовнішнього тертя та їх вплив на процеси зношування трибоспряження деталей машин

В статті розглянуті сутність та механізми внутрішньої і зовнішнього тертя, їх характеристики. Узагальненою характеристикою зовнішнього тертя є вибіркове нерівномірне зношування навантажених робочих поверхонь деталей. Динамічні механізми релаксації напружень поверхневих шарів матеріалів деталей трибоспряжень є механізмом дисипації енергії в процесі внутрішнього тертя. Зазначено, що типовими процесами механічної релаксації в зразках релаксаційного внутрішнього тертя є і релаксація Сноєка, релаксація Кестера і зерногранична релаксація. Розглянуто їх специфіку. Виявлено, що релаксаційні процеси при недостатності дисипативних властивостей тонкої структури матеріалу сприяють підвищенню зносостійкості.

**внутрішнє та зовнішнє тертя, зношування, дисипація енергії, механічна релаксація, зносостійкість, деформація, дислокації**

**Постановка проблеми.** Питання, пов'язані із зовнішнім та внутрішнім тертям і їх впливом на структуру, міцність та процеси зношування матеріалів трибоспряжень деталей машин, вивчені в недостатній мірі. Взаємозв'язок механізмів зовнішнього та внутрішнього тертя представляє інтерес не лише з практичної точки зору, але і як одне з явищ, пов'язаних з особливостями визначальних властивостей матеріалів і фізико-хімічних процесів, що протікають в поверхневих шарах матеріалів деталей трибоспряжень.

Підвищення зносостійкості і надійності, зниження експлуатаційних та енергетичних витрат є нагальною проблемою, загальною для всіх областей техніки. В процесі експлуатації зношування деталей і робочих органів машин збільшує тяговий опір агрегатів, витрату палива і простій машин, зв'язаних з періодичною заміною зношених деталей або їх відновленням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні положення теорії руйнування поверхневих шарів деталей при терті сформульовані за даними досліджень, проведених вітчизняними [1-4] і зарубіжними вченими [5-7], а також колективом співробітників ЦНТУ [8,9]. Виявлено основні закономірності зміни зношувальної здатності деталей в залежності від напружено-деформованого [11,12] та структурного станів поверхневих шарів їх матеріалів [9,10], фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей, характеристик матеріалів робочих (технологічних) середовищ [13,14]. В роботі [15] дано теоретичне обґрунтування методів зниження інтенсивності зношування на основі удосконалення конструкції, оптимізації їх робочих поверхонь та методів і варіантів зміцнення. З'ясовані умови реалізації ефекту самоорганізації робочих (технологічних) середовищ та поверхонь спряжень деталей машин [16].

Виявлено, що процеси зовнішнього тертя та зношування відбуваються при динамічній контактній взаємодії. Причому динамічне напруження зони контакту матеріалів трибоспряжень деталей тертя визначається не стільки макропоказниками зовнішнього тертя (ЗТ), скільки релаксаційними властивостями їх поверхневих шарів [17].

З дисипацією механічної енергії, що підводиться до спряжень деталей машин пов'язаний цілий комплекс фізико-хімічних явищ, які відбуваються в поверхневих шарах матеріалу при взаємодії з робочим (технологічним) та навколишнім середовищем [18]. При цьому важливо виявити роль ЗТ і внутрішнього тертя (ВТ) у цих процесах, їх взаємний перехід і взаємозв'язок та з'ясувати їх вплив на процеси зношування та руйнування трибоспряжень деталей машин, а також розробити способи підвищення їх зносостійкості на основі виявлених механізмів внутрішнього та зовнішнього тертя [19].

Одним із способів підвищення зносостійкості і отримання оптимальної структури матеріалу з мінімальним зношуванням є контроль і управління режимами внутрішнього і зовнішнього тертя. Це потребує наукового обґрунтування підходу вибору параметрів залежно від реологічних і трибологічних властивостей матеріалів трибоспряжень деталей.

Також слід з'ясувати систему ознак здатності матеріалів деталей, робочих та технологічних середовищ трибоспряжень деталей до реалізації процесів та станів самоорганізації [9,20]. При цьому істотного зниження дефектності деталей можна досягти за умови повної дисипації механічної енергії, враховуючи властивості в'язкості і умов протікання процесів ЗТ і ВТ [21,22]. В зв'язку з цим в'язкість є досить вивченою властивістю дисперсних систем [23,24], проте в розрахунках параметрів трибоспряжень деталей машин не враховується залежність в'язкості від швидкості деформації матеріалу деталі, що забезпечується механізмами внутрішнього тертя.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є з'ясування механізмів внутрішнього та зовнішнього тертя спряжень деталей, їх вплив на процеси зношування та розробка на цій основі способів зміцнення робочих поверхонь деталей і реалізації процесів та станів самоорганізації.

**Виклад основного матеріалу.** Серед зовнішніх факторів, що впливають на процес ЗТ є навантаження, швидкість ковзання і температура в зоні тертя. Незалежно від механізму зношування поверхневе чи приповерхневе руйнування, як правило, починається в місцях концентрації напруження. Фактори, що обумовлюють зносостійкість, трибо спряжень деталей машин повинні забезпечувати деконцентрацію контактних напружень, поверхневу локалізацію й однорідність деформації, що пов'язано з реологічними або релаксаційними властивостями матеріалів деталей.

Механічна енергія, що підводиться при зовнішньому терті передається в матеріали деталей трибоспряження за допомогою хвиль "деформація-напруження", трансформуючись у внутрішнє тертя, яке обумовлене непружними явищами і характеризує здатність матеріалу деталі незворотно розсіювати енергію механічних коливань, перетворюючи її в теплову.

Узагальненою характеристикою ЗТ є нерівномірне зношування найбільш навантажених робочих поверхонь деталей, тобто вибіркове зношування цих поверхонь, обумовлене нерівномірністю розподілу питомого тиску, відмінностями швидкостей і прискорень частинок зносу в процесі їх відносного переміщення по робочій поверхні деталей трибоспряжень.

Механізми дисипації енергії в процесі ВТ за своєю суттю є динамічними механізмами релаксації напружень, що виникають у приповерхневих шарах матеріалів деталей трибоспряжень. Релаксація напружень в зонах контакту обумовлена високим

ВТ деталей машин, що призводить до більш рівномірного їх перерозподілу як на поверхні, так і в об'ємі матеріалу деталей, що запобігає необоротне накопичення дефектів та викликає концентрацію напружень. Звідси випливає, що чим більше частка механічної енергії, що підводиться при ЗТ, розсіюється у формі тепла. Це призводить до того, що чим вища повинна бути зносостійкість спряжень деталей, тим більше спостерігається процес розсіювання механічної енергії. Інформацію про протікання процесів, що відбуваються в матеріалах деталей на границях зерен структури матеріалів деталей дає метод ВТ. Цей метод має високу чутливість до змін складу і структури міжкристалічних поверхонь і приграничних областей.

Вимір температурних та амплітудних залежностей ВТ проводили на установці (рис. 1), що працює за принципом зворотного крутильного маятника. Її характеристики: оцінка коефіцієнта тертя, абразивного зношування поверхонь тертя, методами "голка по диску" та "кулька по диску"; дозволяє змінювати силу тиску до 60 Н, вимірювати силу тертя до 20 Н, змінювати частоту обертання в діапазоні  $1 + 1500$  об/хв, проводити випробування в рідкому середовищі до температури 250°C або на повітрі до 800°C.

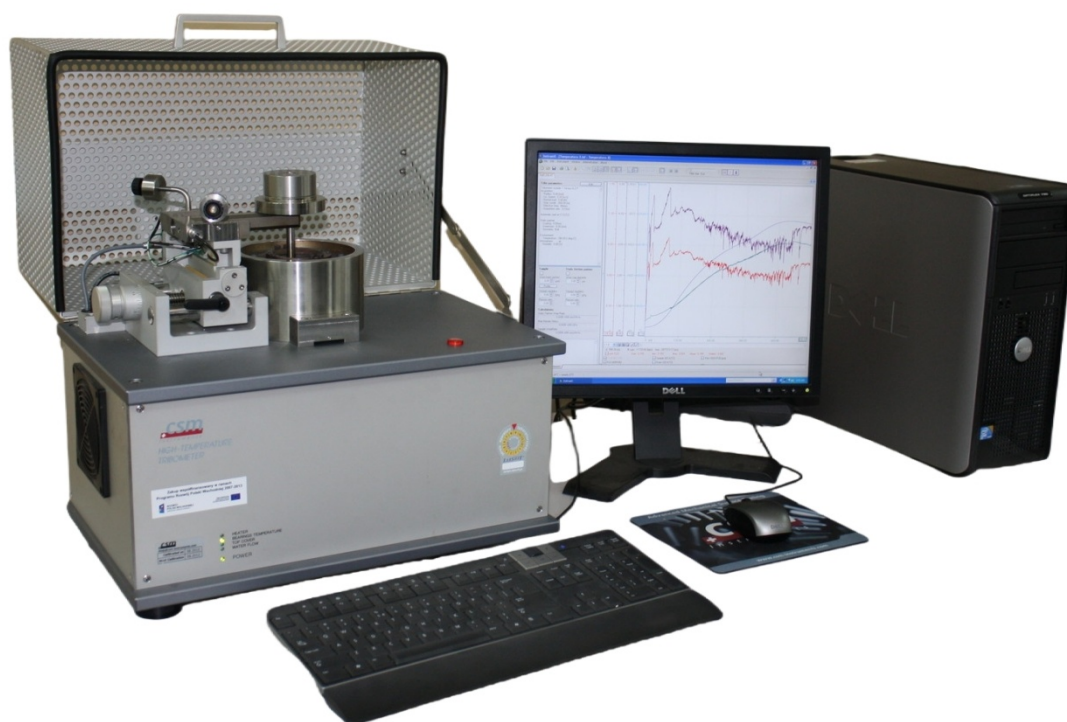


Рисунок 1 – Установка для вимір температурних та амплітудних залежностей ВТ

Джерело: [7]

Оскільки залежності ВТ часто мають екстремальний характер, то виявляються характерні піки ВТ при збільшенні температури, відносній швидкості руху зразків деталей трибоспрямижень або нормального навантаження до рівнів, що відповідають тому чи іншому піку ВТ. При цьому спостерігається зниження зносу. Типовими процесами механічної релаксації в металевих зразках, релаксаційного ВТ є: релаксація Сноєка (РС), релаксація Кестера (РК) і зерногранична релаксація (РЗГ).

Зазначимо, що пік ВТ Сноєка пов'язаний з дифузією атомів за механізмом впровадження (вуглець, азот та ін.) в полі напружень металів при циклічній деформації. Зміни деформації при цьому викликані перерозподілом цих атомів у полі напружень, які запізнюються відносно до змін напружень.

Деформаційний пік Кестера є результатом взаємодії дислокацій, що виникають

при пластичній деформації матеріалу (металу) з домішковими атомами впровадження.

Ефекти зернограничної релаксації відображають в'язкий плин по поверхням та субповерхням поділу, а також рухливість вакансій і атомів в приграничних областях. При співпаданні періоду деформації з часом релаксації процесу міграції між границею і об'ємом зерна спостерігається максимальне розсіювання енергії коливань та з'являється пік ВТ.

Для дослідження зазначених явищ, виявлення механізму процесів, що відбуваються, проведені дослідження впливу швидкості тертя ковзання на характеристики тертя і зношування сталей з різною первиною термообробкою. При цьому матеріали деталей трибоспряжень будуть відрізнятися за реологічними властивостями поверхні у середовищах з різною окиснювальною здатністю.

Важливими факторами збільшення зносостійкості матеріалів деталей трибоспряжень і зниження динамічного напруження поверхонь ЗТ є динамічне деформаційне зміцнення (ДДЗ). Дисипація підведеної механічної енергії здійснюється за рахунок невідосконалої пружності контактуючих матеріалів, тобто ВТ, як прояв релаксаційного процесу.

Для розвитку ДДЗ необхідне виконання принаймні трьох умов:

- створення пластичних деформацій вільних дислокацій в матеріалах деталей;
- наявність атомів домішків в твердому розчині матеріалу деталей трибоспряження;
- забезпечення динамічної взаємодії між генеруючими дислокаціями і атомами домішок в матеріалах деталей.

Виявлено, що чим більша швидкість деформації, тим при більш високій температурі проявляється ефект ДДЗ. Формування дислокаційної субструктури під час ДДЗ відбувається в умовах динамічного блокування дислокацій атомами домішків. Процес деформації розвивається, в основному, за рахунок генерації нових дислокацій, а щільність існуючих дислокацій в процесі ДДЗ швидко збільшується. Тривалість проходження ДДС дорівнює часткам секунди. Тому головним постачальником атомів домішок для блокування дислокацій є твердий розчин. Процес ДДС завершується звичайно утворенням атмосфер чи сегрегацій на дислокаціях (без дрібнодисперсних включень). Дислокаційні сегменти між точками закріплення залишаються частково рухомими, і сталевий матеріал деталі зберігає достатню пластичність. Температура, що стимулює підвищену дифузійну рухомість атомів домішок до рівня швидкості руху дислокацій при даній швидкості тертя, співпадає з температурою виникнення окисної плівки. Зміцнення внаслідок ДДС значно підвищує твердість, границю міцності, границю втомленості і витривалості.

Результати досліджень зносостійкості спряжених матеріалів зразків деталей проведені за схемою "ролик-вкладиш". Ролик виготовлено зі сталі 25, а вкладиш зі сталі 45. Дослідження проводили в діапазоні швидкостей 0,3...3,0 м/с на повітрі на машині 2070 СМТ-1 (рис.2).

Результати досліджень наведенні в таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність зносу  $u$  сталі 25 від швидкості руху  $v$  зразка на повітрі,  $T=473K$

|           |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $v$ , м/с | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,75 | 1,0 | 1,25 | 1,5  | 1,75 | 2,0  | 2,25 | 2,5  | 2,75 | 3,0  |
| $u$ , г   | 5,00 | 1,10 | 0,55 | 0,12 | 0,8 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,07 |

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 – Загальний вид машини тертя 2070 CMT-1

Джерело: розроблено авторами

З отриманих результатів випливає, що при швидкостях тертя 0,3...1,0 м/с зношування сталі 25 зменшується: при температурі в зоні тертя біля 573K ( $v=1,0...1,5$  м/с) зносостійкість зростає в декілька десятків разів. В результаті чого формується інтервал мінімального зносу, що відповідає релаксації Кестера при зазначеній температурі (табл. 2).

Таблиця 2 – Залежність дикримента  $\delta$  затухання внутрішнього тертя від температури T

| T, K                | 373 | 423 | 473 | 523 | 573 | 623 | 673 | 723 | 773 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\delta \cdot 10^4$ | 10  | 15  | 20  | 30  | 52  | 40  | 18  | 10  | 20  |

Джерело: розроблено авторами

Під час старіння деформованої сталі 25 на температурній залежності внутрішнього тертя на інтервалі 473...573 K (табл. 2), з'являється деформаційний максимум ВТ (релаксація Кестера). З'ясовано, що чим більша висота і площа піку Кестера, тим вища релаксаційна здатність матеріалу деталей машин. Під час ДДС відбувається релаксація напружень безпосередньо в процесі деформації, внаслідок чого зростає енергоємність матеріалу (сталі), знижується динамічна напруженість поверхні тертя, зменшується імовірність появи релаксаційних тріщин. Таким чином, при певній комбінації теплового і механічного впливів на матеріал (сталь) деталі при взаємодії ЗТ і ВТ. При цьому відбувається термопластичне (субструктурне) зміцнення. В таких умовах формується комірчаста структура з розвитком ДДС. Визначено, що перерозподіл дислокацій всередині субзерен (комірок) та генерування дислокацій субграницями сприяє релаксації пікових локальних напружень за механізмами гістерезисного і мікропластичного ВТ, запобігаючи крихкому руйнуванню зміцнених об'ємів матеріалу деталей машин.

Виявлено також, що при зниженні температури деформації зростає напруження ВТ, що ускладнює поперечне ковзання й зменшує імовірність утворення комірчастої структури, а сам розмір комірок зменшується, що приводить до зниження мікропластичності і релаксаційної здатності матеріалу поверхні тертя деталей

трибоспряження.

Виявлено, що явище зміни механічних властивостей металів деталей машин при зміні температурно-швидкісних умов випробувань є характерним не тільки для тертя.

Дослідженнями впливу температурно-швидкісних режимів деформації будь-якого виду на опір деформації технічного заліза і сталі в певному температурному інтервалі (473...573K). Зафіксовано підвищену міцність і твердість сталі (табл. 3), що обумовлено розвитком процесів ДДС.

Таблиця 3 – Залежність границі втомленості  $\sigma_{-1}$  та твердості HV від температури випробувань T

|                     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| T, K                | 373 | 423 | 473 | 523 | 573 | 623 | 673 | 723 | 773 |
| $\sigma_{-1}$ , МПа | 280 | 320 | 390 | 440 | 455 | 440 | 400 | 350 | 290 |
| HV, ГПа             | 0,9 | 1,2 | 1,3 | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що відхилення від монотонної температурної залежності механічних характеристик не супроводжується змінами мікроструктури. Тільки на поверхні з'являється окисна плівка характерного синього кольору.

Визначено, що важливими факторами збільшення зносостійкості матеріалу деталей і зниження динамічної напруженості поверхонь тертя є зміцнення внаслідок ДДС і дисипації підведеної механічної енергії з боку ЗТ за рахунок невідосконалої пружності контактуючих матеріалів трибоспряження деталей, тобто переходу до ВТ, як прояву релаксаційного процесу.

На важливість ролі релаксаційних процесів, що протікають в матеріалах деталей, крім ефекту зміцнення, вказують і результати випробування загартованих сталей, які, не дивлячись на високу твердість і міцність, виявляють низьку зносостійкість при підвищених температурно-швидкісних режимах ЗТ.

Результати проведених лабораторних досліджень загартованих і високо відпущених вкладишів зі сталі 45 в спряженні з роликами зі сталі 25, подано в табл. 4.

Таблиця 4 – Закономірності зміни зносу і коефіцієнту тертя загартованих і відпущених зразків Ст 25 і Ст 45 від зміни швидкості і температури в зоні тертя

|                                                                        |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $v$ , м/с                                                              | 0,3  | 0,5  | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 2,5  | 3,0  |
| T, K                                                                   | 333  | 353  | 403  | 453  | 503  | 553  | 593  |
| Знос загартованих зразків сталі 25 і сталі 45                          |      |      |      |      |      |      |      |
| $u$ , г                                                                | 5,0  | 0,20 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
|                                                                        | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,04 |
| Знос зразків сталі 25 і сталі 45, відпущених при 873 K                 |      |      |      |      |      |      |      |
| $u$ , г                                                                | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,08 |
|                                                                        | 1,20 | 0,08 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
| Коефіцієнт тертя загартованих і відпущених зразків сталі 25 і сталі 45 |      |      |      |      |      |      |      |
| $f_{тр}$                                                               | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,35 |
|                                                                        | 0,47 | 0,43 | 0,38 | 0,33 | 0,32 | 0,33 | 0,34 |

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що високовідпущена сталь при малих швидкостях катастрофічно зношується, але при зростанні швидкості переходить в стан високого опору зношуванню. Загартована сталь навпаки, при малих швидкостях тертя чинить опір зносу, а при великих – знос набуває екстремальних значень. Сталь після загартування

характеризується підвищеною структурною метастабільністю і, відповідно, підвищеним ВТ структурно-дислокаційної природи. Це являє собою так званий домінуючий захисний механізм дисипації механічної енергії при невисоких швидкостях і температурах тертя. Зазначимо також, що структурно-дислокаційна релаксація матеріалів трибоспряження деталей запобігає схоплюванню.

Відносно вузький діапазон швидкості, в якому знос зразків деталей мінімальний, пов'язаний з особливостями геометрії трибоспряження, в якій погіршується тепловіддача, що призводить до більш швидкого розігрівання в процесі тертя, а отже і прояву низькотемпературного дифузійного піку Сноєка (перерозподіл атомів впровадження в полі діючих напружень). Подальше підвищення швидкості викликає падіння зносостійкості. Першопричиною різкого збільшення зносу загартованої сталі при певних температурно-швидкісних умовах є процеси ДДС (відпускання під навантаженням). При цьому відбувається розподіл пересиченого твердого розчину (мартенситу) в полі напружень, створеному зовнішнім навантаженням. Зазначене викликає збільшення дисперсності карбідних включень, щільності їх розподілу, появу сегрегації на дислокаціях.

Динамічне старіння матеріалу, особливо при підвищених температурах, інтенсивно впливає на субструктурні процеси: відбувається стабілізація структури сталі, яка супроводжується різкою релаксаційною здатністю. Про це свідчить зменшення піка Кестера. Значний інтервал швидкостей, в якому спостерігається висока зносостійкість, обумовлено рядом факторів: особливостями геометрії трибоспряження деталей; збільшенням швидкості навантаження, що приводить до зміщення піку Кестера; спостереженням магнітомеханічного гистерезису, який відіграє суттєву роль зі зростанням амплітуди циклічної інформації і температури відпускання.

Результати лабораторних досліджень підтверджують міркування, що стосуються матеріалів з різною термообробкою. Встановлено, що при малих швидкостях (0,3 м/с) знос загартованої сталі 45 на два порядки менший зносу відпущеної сталі, а при підвищених швидкостях (3,0 м/с) навпаки, загартована сталь 45 зношується набагато інтенсивніше високовідпущеної. Що стосується зношуваної здатності загартованої сталі 45, то вона в багато разів менша від високовідпущеної сталі, але при підвищених швидкостях картина змінюється на протилежну.

Виявлено, що діапазон швидкостей ковзання зразків деталей, що відповідає мінімізації зносу, залежить від структурного стану сталей. Сталі після високого відпускання при малих швидкостях катастрофічно зношуються, але при зростанні швидкості до 0,5...1,0 м/с переходять в стан, що чинить високий опір зношуванню і зберігає його в великому діапазоні швидкостей до 3,0 м/с. Загартована сталь навпаки, при малих швидкостях тертя чинить опір зносу, а при великих – знос набуває екстремуму.

З процесами релаксації пов'язана і зміна коефіцієнту тертя. При малих швидкостях тертя сталі після високого відпускання підлягають схоплюванню, що підвищує коефіцієнт тертя.

Під час періодичної деформації поверхневого шару деталі при ЗТ в ньому порушується термодинамічна рівновага і при певній температурі і частоті навантаження виникають релаксаційні процеси, що приводять до відставання процесу деформації від напруження. Внаслідок чого значна частина механічної енергії, що підводиться в фізичних контактах трибоспряження зразків деталей незворотно розсіюється у вигляді тепла. Так, релаксація Кестера, що виникає в сталях при температурах 473...623К формує пік ВТ, пов'язаний з пластичною деформацією і присутністю атомів вуглецю і азоту.

Релаксація може бути пов'язана і з переорієнтацією атомів впровадження в силовому полі дислокацій матеріалу деталей під впливом полів створених напружень. Висота піка ВТ зростає зі збільшенням температури загартування сталі, деформації, температури деформації і концентрації атомів впровадження. Зі збільшенням ступеня деформації температура піку може знизитись до 443...453K. Якщо в сталь вводити легуючий карбідоутворюючий елемент, то пік ВТ зміщується в бік більш високих температур, або зовсім зникає.

Релаксація поверхневих шарів трибоспряження деталей – це самопідстроювання системи в часі до його нового рівноважного стану у відповідь на зміну параметру ЗТ. Якщо таким параметром є напруження, то встановлення в часі рівноважного значення в трибоспряженні деталей змінної деформації матеріалу проявляється як непружна механічна релаксація. Під час цього відбувається підстроювання до рівноважного значення параметра ВТ. Протягом цього інтервалу часу здійснюється безпосередній зв'язок між напруженням і деформацією.

Релаксація параметру ВТ супроводжується процесами переносу, тобто, непружна деформація є термодинамічною властивістю, обумовленою зв'язком напруження і деформації з параметрами, зміна яких може відбуватися внаслідок кінетичних процесів. Зазначимо, що зсувні напруження при температурі нижче температури піку ВТ не викликають ефективного руху дислокацій. Це відбувається внаслідок того, що атоми впровадження, що закріплюють їх, є нерухомими. При температурі вищій температури піку ВТ дислокації і атоми домішків зміщуються за фазою прикладеного напруження. При температурі, що відповідає піку ВТ, домішкові атоми відстають від дислокацій, обумовлюючи при цьому непружну (механічну) релаксацію.

В залежності від швидкості ковзання для процесу ЗТ і зношування поверхневих шарів деталей трибоспряжень характерні зони високої та низької зносостійкості поперемінно чергуються. Звісно, що ці зони обумовлені релаксаційними властивостями зміцнених поверхневих шарів спряжених деталей внаслідок термообробки або в процесі їх контактної взаємодії. Визначено, що високі дисипативні властивості матеріалу деталі сприяють зниженню інтенсивності його зносу. Якщо матеріал втратить релаксаційні властивості, то це негайно приведе до його інтенсивного зношування.

Виявлено також, що релаксаційні хімічні процеси при недостатності дисипативних властивостей тонкої структури матеріалу також сприяють підвищенню зносостійкості. При високому рівні ВТ матеріалу його зносостійкість буде максимальна.

В процесі досліджень виявлено, що ВТ і ЗТ можна істотно зменшити, оптимізуючи матеріал деталі зміною його хімічного складу з реалізацією стану самоорганізації робочих поверхонь деталей. Зазначене можна покласти в основу розробки ефективних технологій зміцнення. Результати експериментальних досліджень механізмів ЗТ і ВТ та теоретичне їх обґрунтування дають можливість встановити технологічні та трибофізичні критерії змін характеристик та властивостей поверхневих шарів, матеріалів трибоспряжень деталей, в тому числі і зношувальної здатності, при їх взаємодії. Оскільки при експлуатації деталей автотранспортної і сільськогосподарської техніки спостерігається вибіркове зношування локальних областей їх робочих поверхонь, то при виборі методів зміцнення доцільно використовувати і диференціальний підхід.

Перспективними в цьому напрямку будуть неврівноважені технології зіцнення, які в поєднанні з нерівноважними процесами тертя можуть сформувати ефективні процеси і стани самоорганізації.

**Висновки:** 1. Результати експериментальних досліджень та їх теоретичні обґрунтування дали можливість встановити технологічні та трибофізичні критерії зміни характеристик та властивостей поверхневих шарів, в тому числі зношувальної здатності, при їх взаємодії.

2. Оскільки при експлуатації деталей машин спостерігається вибіркове зношування локальних областей робочої поверхні, то при виборі методів зміцнення доцільно використовувати диференціальний підхід.

3. Виявлено, що ВТ і ЗТ можна істотно зменшити оптимізуючи матеріал деталі хімічним складом, реалізацією стану самоорганізації робочих поверхонь деталей. Зазначене може скласти основу для розробки ефективних технологій зміцнення.

## Список літератури

1. Аулін В.В. Підвищення надійності трибосистем реалізацією процесів самоорганізації. Матеріали III міжнар. наук.-техн. конф.: "Сучасні проблеми триботехніки", 7-9 жовтня 2009р. Миколаїв: НУК, С 15-17.
2. Stachowiak, G. Peter J. Blau (2017): Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems. Tribol Lett 65, 136.
3. Blau, P.J. (2009) Friction Science and Technology: From Concepts to Applications. CRC Press, Boca Raton, 43-118.
4. Mikhail S. Blanter, Igor S. Golovin, Hartmut Neuhäuser, Hans-Rainer Sinning Internal Friction in Metallic Materials. Springer Berlin, Heidelberg. 12 June 2007.
5. Clogston A.M.. Relaxation phenomena in ferrites. The Bell System Technical Journal. Volume: 34, Issue: 4, July 1955.
6. Morris J.G. Dynamic strain aging in aluminum alloys. Materials Science and Engineering. Volume 13, Issue 2, February 1974, Pages 101-108. Materials Testing Laboratory. URL: <https://kois.prz.edu.pl/en/laboratories/materials-testing-laboratory> (дата звернення : 01.08.2024).
7. Аулін В.В., Головатий А.О., Мірний В.Ю., Кузик О.В. Розробка технологій зміцнення деталей сільськогосподарської техніки з урахуванням зовнішнього та внутрішнього тертя в матеріалах. Збірник тез I Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців "Перспективи та тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарських машин та знарядь". 16-17 жовтня 2014 р. Житомир: Житомирський агротехнічний коледж, 2014. С. 52-54.
8. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія. Кіровоград: КОД, 2014. 370 с.
9. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохімія та реологія зносостійкості: монографія. Хмельницький: ХНУ. 2006. 278 с.
10. Baker L.J., Parker J.D., Daniel S.R. The use of internal friction techniques as a quality control tool in the mild steel industry. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143-144. p. 442-447.
11. Hoyos J.J., Ghilarducci A.A., Salva H.R., Chaves C.A., Vélez J.M. (2011). Effects of tempering on internal friction of carbon steels. *Materials Science and Engineering: Properties, Microstructure and Processing*. Vol. 528, Issue 9. p. 3385-3389.
12. Leisure R.G., Foster K., Hightower J.E., Agosta D.S. Internal friction studies by resonant ultrasound spectroscopy. *Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 13th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy*. 2004. Vol. 370, Issues 1-2. p. 34-40.
13. Li S., Deng L., Wu X., Wang H., Min Y. Low-frequency internal friction investigating of the carbide precipitation in solid solution during tempering in high alloyed martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527, Issue 26. p. 6899-6903.
14. Lu X., Jin M., Zhao H., Li W., Jin X. Origin of low-temperature shoulder internal friction peak of Snoek-Kester peak in a medium carbon high alloyed steel. *Solid State Communications*. 2014. Vol. 195. p. 31-34.
15. Shevelya V., Sokolan J., Kupiec B., Korenivskiy M. Effect of Viscoelastic Properties of Treated Steel on the Rheology and Dissipative Properties of Frictional Contact. *Archives of Foundry Engineering*. 2-14. Vol. 14, Special Issue 1. p. 193-198.
16. Shevelya V. V., Sokolan Yu. S. Dynamic relaxation processes in steel friction under the action of heat treatment. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, No. 4. p. 524-531.
17. Tkalec J., Mari D. Internal friction in martensitic, ferritic and bainitic carbon steel; cold work effects. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 370, Issues 1-2. p. 213-217.
18. Tkalec J., Mari D., Benoit W. Correlation between internal friction background and the concentration of

- carbon in solid solution in a martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 14th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy*. 2006. Vol. 442, Issues 1-2. p. 471-475.
19. Zheng S., Urueña J. M., Dunn A. C., Uhl J. T., and Dahmen K. A. Similarity of internal and external friction: Soft matter frictional instabilities obey mean field dissipation through slip avalanches. *Phys. Rev. Research* 2020. 2. 042016(R).
20. The basic principles and applications of internal friction and mechanical spectroscopy [J]. *PHYSICS*, 2011, 40(12): 786-793.
21. Wert C. A. Internal friction in solids. *J. Appl. Phys.* 1986. 60, 1888-1895.
22. Nian Yin, Zhiguo Xing, Ke He, Zhinan Zhang. Tribo-informatics approaches in tribology research: A review, *Friction*, 2020. 1, p. 1-22.
23. Nian Yin and Zhinan Zhang. *Tribo-Informatics: The Systematic Fusion of AI and tribology*. CRC Press. 2014. 220.

## References

1. Aulin V.V. (2009). Pidvyshchennia nadiinosti trybosystem realizatsiieiu protsesiv samoorhanizatsii [Increasing the reliability of tribosystems by implementing self-organization processes]. *Materialy III mizhnar. nauk.-tekhn. konf.: "Suchasni problemy trybotechniky - Modern problems of tribotechnics"*, 7-9 zhovtnia 2009r. Mykolaiv: NUK, S 15-17 [in Ukrainian].
2. Stachowiak, G. Peter J. Blau (2017): *Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems*. *Tribol Lett* 65, 136. [in English].
3. Blau, P.J. (2009) *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. CRC Press, Boca Raton, 43-118. [in English].
4. Mikhail S. Blanter, Igor S. Golovin, Hartmut Neuhäuser, Hans-Rainer Sinning Internal Friction in Metallic Materials. Springer Berlin, Heidelberg. 12 June 2007. [in English].
5. Clogston A.M.. Relaxation phenomena in ferrites. *The Bell System Technical Journal*. Volume: 34, Issue: 4, July 1955. [in English].
6. Morris J.G. Dynamic strain aging in aluminum alloys. *Materials Science and Engineering*. Volume 13, Issue 2, February 1974, Pages 101-108. *Materials Testing Laboratory*. URL: <https://kois.prz.edu.pl/en/laboratories/materials-testing-laboratory> (date of application : 01.08.2024) [in English].
7. Aulin V.V., Holovatyi A.O., Mirnyi V.Iu., Kuzyk O.V. (2014). Rozrobka tekhnolohii zmitsnennia detalei silskohospodarskoï tekhniky z urakhuvanniam zovnishnoho ta vnutrishnoho tertia v materialakh [Development of technologies for strengthening parts of agricultural machinery taking into account external and internal friction in materials]. *Zbirnyk tez I Vseukrainskoï naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv ta molodykh naukotsiv "Perspektyvy ta tendentsii rozvytku konstruksii silskohospodarskykh mashyn ta znariad - Prospects and trends in the development of constructions of agricultural machines and tools"*. 16-17 zhovtnia 2014 r. Zhytomyr: Zhytomyrskyi ahrotekhnichniy koledzh, S. 52-54 [in Ukrainian].
8. Aulin V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotechnichnykh systemakh: Monohrafiia* [Physical basis of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: Monograph]. Kirovohrad: KOD, 370 s [in Ukrainian].
9. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P. (2006). *Tribokhimiya i reologiya iznosostoikosti [Tribocchemistry and rheology of wear resistance]*. Khmel'nitskii: KhNU. 278 s [in Russian].
10. Baker L.J., Parker J.D., Daniel S.R. (2003). The use of internal friction techniques as a quality control tool in the mild steel industry. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 143-144. p. 442-447 [in English].
11. Hoyos J.J., Ghilarducci A.A., Salva H.R., Chaves C.A., Vélez J.M. (2011). Effects of tempering on internal friction of carbon steels. *Materials Science and Engineering: Properties, Microstructure and Processing*. Vol. 528, Issue 9. p. 3385-3389 [in English].
12. Leisure R.G., Foster K., Hightower J.E., Agosta D.S. (2004). Internal friction studies by resonant ultrasound spectroscopy. *Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 13th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy*. Vol. 370, Issues 1-2. p. 34-40 [in English].
13. Li S., Deng L., Wu X., Wang H., Min Y. (2010). Low-frequency internal friction investigating of the carbide precipitation in solid solution during tempering in high alloyed martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527, Issue 26. p. 6899-6903 [in English].
14. Lu X., Jin M., Zhao H., Li W., Jin X. (2014). Origin of low-temperature shoulder internal friction peak of Snoek-Kester peak in a medium carbon high alloyed steel. *Solid State Communications*. Vol. 195. p. 31-34.

15. Shevelya V., Sokolan J., Kupiec B., Korenivskiy M. (2014). Effect of Viscoelastic Properties of Treated Steel on the Rheology and Dissipative Properties of Frictional Contact. Archives of Foundry Engineering. Vol. 14, Special Issue 1. p. 193-198 [in English].
16. Shevelya V. V., Sokolan Yu. S. (2015). Dynamic relaxation processes in steel friction under the action of heat treatment. Strength of Materials. 2015. Vol. 47, No. 4. p. 524-53 [in English].
17. Tkalcec J., Mari D. (2011). Internal friction in martensitic, ferritic and bainitic carbon steel; cold work effects. Materials Science and Engineering: A. Vol. 370, Issues 1-2. p. 213-217 [in English].
18. Tkalcec J., Mari D., Benoit W. (2006). Correlation between internal friction background and the concentration of carbon in solid solution in a martensitic steel. Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 14th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy. Vol. 442, Issues 1-2. p. 471-475 [in English].
19. Zheng S., Uruña J. M., Dunn A. C., Uhl J. T., and Dahmen K. A. (2020). Similarity of internal and external friction: Soft matter frictional instabilities obey mean field dissipation through slip avalanches. Phys. Rev. Research 2, 042016(R) [in English].
20. The basic principles and applications of internal friction and mechanical spectroscopy [J]. PHYSICS, 2011, 40(12): 786-793 [in English].
21. Wert C. A. (1986). Internal friction in solids. J. Appl. Phys. 60, 1888-1895 [in English].
22. Nian Yin, Zhiguo Xing, Ke He, Zhinan Zhang. (2020). Tribo-informatics approaches in tribology research: A review, Friction, 1, p. 1-22 [in English].
23. Nian Yin and Zhinan Zhang (2024). Tribo-Informatics: The Systematic Fusion of AI and tribology. CRC Press. 220 [in English].

**Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Oleksandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Inna Zhylova**, Graduate student  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Mechanisms of Internal and External Friction and their Influence on Wear Processes of Tribo-coupling of Machine Parts**

The article describes the essence and mechanisms of internal and external friction, their characteristics. A generalized characteristic of external friction is the selective uneven wear of the loaded working surfaces of parts. Dynamic mechanisms of stress relaxation of the surface layers of materials of tribocoupler parts are a mechanism of energy dissipation in the process of internal friction. It is noted that the typical processes of mechanical relaxation in samples of relaxation internal friction are Snoek relaxation, Kester relaxation, and grain boundary relaxation. Their specifics are considered.

The process of dynamic strain hardening and its influence on wear processes are considered. It is indicated that for the development of the specified strengthening of the samples, it is necessary to create plastic deformations of free dislocations in the materials of the parts, the presence of impurity atoms in the solid solution of the material of the triboconjugation parts, and the provision of dynamic interaction between generating dislocations and impurity atoms in the materials of the parts. It is shown that hardness, the limit of strength, fatigue and endurance increases.

The results of laboratory studies of hardened and highly tempered samples of parts made of steels 25 and 45 on the installation for measuring the temperature and amplitude dependences of internal friction and on the friction machine 2070CMT-1 are given. The rationale for heat treatment regimes and changes in wear patterns and friction coefficient is given. It is shown that the realization of the internal friction parameter is accompanied by transfer processes. It was found that relaxation processes in case of insufficient dissipative properties of the fine structure of the material contribute to the increase of wear resistance.

**internal and external friction, wear, energy dissipation, mechanical relaxation, wear resistance, deformation, dislocations**

*Одержано (Received) 01.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.09.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.07:005.334

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.261-269](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269)**Д.О. Кульова**, д-р філос., ст. вик.*Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна**Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: d.coolava@gmail.com*

## Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на транспорті

У статті розглянуто концептуальний підхід ризик-менеджмент та можливості його застосування в сфері безпеки руху на транспорті. Сформовано засади для впровадження основних етапів ризик-менеджменту, таких як формування середовища, загальне оцінювання ризиків (ідентифікація, аналіз, оцінка) і обробка ризиків, а також моніторинг ефективності заходів мінімізації ризиків. Висвітлено взаємозв'язок між етапами, значення обміну інформацією та консультуванням на кожному етапі, а також ведення реєстру ризиків для систематизації даних.

Особливу увагу приділено впровадженню ризик-менеджменту в сфері автомобільного транспорту, зокрема інтелектуалізації перевізного процесу, узгодженню з чинним законодавством та ефективній взаємодії між усіма зацікавленими сторонами. Застосування такого підходу сприятиме зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод та мінімізації їх наслідків, а значить підвищить рівень безпеки перевізного процесу.

**ризик-менеджмент, безпека руху, автомобільний транспорт, загальне оцінювання ризиків, ризик-орієнтовані підходи, перевізний процес**

**Постановка проблеми.** Забезпечення безпеки дорожнього руху є однією з ключових проблем сучасного транспортного сектору. Щорічно в усьому світі дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) призводять до смертельних випадків, травмувань, пошкоджень транспортних засобів (ТЗ) та інфраструктури, а також серйозних затримок у русі, що негативно впливає на параметри операційної діяльності автомобільного транспорту в цілому.

Зокрема, в Україні, незважаючи на вжиття системних заходів щодо забезпечення належного рівня безпеки та проведення роботи із попередження виникнення ДТП, рівень аварійності продовжує залишатись високим, а показники безпеки руху на автомобільній мережі значно гірші за європейські.

Впровадження Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року[1] має на меті наближення рівня надання транспортних послуг до європейських стандартів, а також підвищення рівня безпеки і зменшення негативного впливу транспорту на довкілля.

Ефективне управління безпекою дорожнього руху потребує системного аналізу ризиків, пов'язаних з різними аспектами транспортної системи. Ідентифікація, аналіз, оцінка та управління ризиками дозволяють прогнозувати можливі небезпечні події та знижувати ймовірність їх виникнення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При організації та реалізації перевізного процесу важливо приділяти увагу питанням попередження ДТП, тобто

розробленню ефективних превентивних заходів, у випадку ж їх настання – необхідним є оперативне впровадження дій по ліквідації негативних наслідків. Застосування ризик-орієнтованих підходів є доцільним, так як робить можливим вищезазначене за рахунок систематичного аналізу потенційної небезпеки, прогнозування ймовірності її виникнення та моделювання наслідків.

Управління ризиками з метою мінімізації, а значить підвищення безпеки перевізного процесу актуальне для всіх видів транспорту. Так в роботі [2] на авіаційному транспорті, а саме для аеропортів, автори застосовують підхід по управлінню ризиками, який складається з шести етапів:

- збір даних;
- ідентифікація небезпеки;
- визначення причин виникнення небезпеки;
- кількісне оцінювання ймовірності;
- якісне оцінювання тяжкості наслідків;
- оцінювання рівня ризиків.

Важливими аспектами методології є використання національних і міжнародних баз даних для аналізу причин небезпеки, застосування теореми повної ймовірності для оцінки ймовірностей, а також умовна оцінка ймовірності для різних типів небезпеки, зокрема екологічної та технічної. Результати показали можливість визначення рівня ризику для кожної ідентифікованої небезпеки, методологія ґрунтується на комплексному підході, який можна адаптувати та ефективно застосувати до конкретного аеропорту з його умовами роботи.

Питанням підвищення рівня безпеки шляхом управління ризиками активно займаються провідні вчені світу, зокрема і на залізничному транспорті, в дослідженні [3] представлені результати оцінювання ризиків для канадських залізниць шляхом використання адаптованої моделі оцінювання ризиків (Canadian Safety Risk Model (C-SRM)). Ризик в контексті роботи визначається як ймовірність виникнення залізничних інцидентів, які призводять до смертельних випадків або травмування. Дослідження зосереджене на двох групах небезпечних подій: сходження рухомого складу з рейок на головних коліях та зіткненнях. Індивідуальні ризики небезпечних подій були оцінені для трьох груп людей: пасажирів, працівників та громадян сторонніх осіб (Members Of Public – термін, який використовується в статті для людей, які не є працівниками залізниць або пасажирами, але можуть перебувати в зоні небезпеки)

Для реалізації функцій C-SRM по ідентифікації та оцінюванню ризиків використано наступні методи: аналіз дерева відмов (Fault Tree Analysis (FTA)) та аналіз дерева подій (Event Tree Analysis (ETA)). Результати моделювання показали, що під час зіткнення ймовірність отримання травм вища, ніж при сходженні рухомого складу з рейок, проте ризик сходження з рейок на головних коліях більший. Оцінка індивідуального ризику для небезпечних подій показала, що найбільший ризик сходження з рейок на головних коліях був пов'язаний з сторонніми особами. Крім того, ризик для працівників був найвищим у разі зіткнень на головних коліях, що пов'язано з людськими помилками, які найчастіше були їх причиною.

Заключним кроком у дослідженні було оцінювання зниження ризиків після впровадження системи керування рухом поїзда Enhanced Train Control (ETC) на канадських залізницях. Результати аналізу показали, що застосування технології ETC є корисним заходом контролю для запобігання аварійним ситуаціям з низькою ймовірністю, але серйозними наслідками у разі їх настання. Однак для прийняття рішення щодо розвитку і використання даної системи на канадських залізницях необхідна додаткова оцінка, зокрема аналіз «витрати–вигоди».

На сьогоднішній день питання знаходження компромісу між витратами на процес управління ризиками та отримання прибутку від перевезень постає дуже гостро. Високий рівень аварійності на транспорті, а саме наслідки від реалізації небезпечних подій мають різномірний характер і несуть в собі, окрім людських жертв – потенційні матеріальні збитки. З іншого боку фінансування ризик-менеджменту має бути адекватним і не впливати на прибутковість галузі, за умови достатнього забезпечення ефективної реалізації всіх заходів безпеки. Важливо знайти баланс, який дозволить забезпечити прийнятний рівень безпеки, зменшуючи ризики для людей і зводячи матеріальні збитки від небезпечних подій до мінімуму, водночас зберігаючи економічну ефективність операцій.

Вирішення питання знаходження компромісу між експлуатаційними витратами та ризиками при перевезенні небезпечних вантажів (НВ) різних класів освітлено в роботах [4, 5]. Одна із складових цільової функції математичної оптимізаційної моделі – визначення ризику через комплексний критерій виникнення більш серйозних наслідків у результаті аварійної ситуації. Визначені складові критерію, які описано в термінах нечіткої логіки, дозволили комплексно виявити взаємний вплив факторів на більш безпечний варіант перевезення таких вантажів.

В дослідженні акцентується увага на важливості інтелектуалізації перевізного процесу при транспортуванні НВ, адже дані вантажі несуть в собі потенційні небезпеки, через їх властивості. Вибухонебезпечні, отруйні, радіоактивні речовини при аварійній ситуації можуть призвести до наслідків зі значно серйознішим рівнем тяжкості. Тому розроблення і впровадження ризик-орієнтованих підходів з кожним роком стають все актуальніші в транспортній галузі.

В роботі [6] автори оцінюють ризики при перевезенні НВ автомобільним транспортом в реальному режимі часу, на основі глибинної нейронної мережі з рекурентними блоками (gated recurrent unit–deep neural network (GRU-DNN)) інтегрованої з мультимодальними вбудовуваними характеристиками (multimodal feature embedding (MFE)). Запропонована модель використовує методи глибинного навчання, що поєднує рекурентні нейронні мережі з фільтрами та глибинні нейронні мережі для обробки різних типів даних (дискретних, безперервних змінних, зображень). MFE дозволяє об'єднувати та аналізувати різномірні дані, підвищуючи точність моделі та її здатність передбачати ризики.

Модель була протестована в Китаї на базі даних про транспортування НВ, що включала 2100 випадків транспортування із 20 факторами ризику в реальному режимі часу (наприклад, тип вантажу, стан дороги, погодні умови, швидкість транспортного засобу та інше), включаючи чотири рівня ризику, який відповідав кожному окремому випадку. Модель показала високу точність до 93.51% на тренувальному наборі (реальних даних про транспортування НВ, на яких модель «вчилася» розпізнавати закономірності між факторами ризику) і 87.6% на валідаційному наборі (частина даних, яка не була використана для навчання, тобто модель їх «не бачила» під час тренування). Дане дослідження демонструє потужність використання глибинного навчання для покращення оцінювання ризиків у реальному режимі часу в процесі транспортування НВ, що значно підвищує безпеку перевізного процесу.

Впровадження систем управління ризиками на основі кількісних та якісних оцінок, ризик-орієнтованих підходів, як у випадку автомобільного, авіаційного, водного чи залізничного транспорту, дозволяє точно визначати пріоритетні зони для покращення показників безпеки та ефективно використовувати ресурси.

Для уникнення розбіжності трактувань основних понять, які стосуються ризиків і управління ними, Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization

for Standardization, ISO) розробила міжнародні стандарти ISO 31073:2022 Risk management – Vocabulary [7] та IES ISO 31010:2009 Risk management – Risk assessment techniques, який має національний відповідник ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT) [8] (на сьогоднішній день існує нове видання стандарту IEC 31010:2019, але відсутній національний офіційний відповідник, який розповсюджує національний орган стандартизації Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»)).

**Постановка завдання.** Мета завдання полягає у формуванні засад для впровадження концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на автомобільному транспорті. Для реалізації поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

– визначити основні етапи ризик-менеджменту та умови при яких підхід може бути ефективно застосований в транспортній галузі;

– визначити можливості впровадження ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на автомобільному транспорті, з урахуванням специфіки галузі та особливостей його реалізації для підвищення рівня безпеки перевезень.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації небезпеки необхідна певна дія, небезпека і дія означає ризик. Згідно з ISO 31073:2022в загальному розумінні ризик – це невизначеність щодо досягнення цілей, а результатом може бути як негативний, так і позитивний відхил від очікуваного (або обидва одночасно). Ризик зазвичай виражається через ймовірність виникнення несприятливої події, наслідки від її реалізації та джерела ризиків.

Оксфордський словник англійської мови [9] визначає ризик як ймовірність небезпеки, поганих наслідків, що може означати втрати. Дане визначення більш точно відповідає контексту безпеки на транспорті. В більшості класичних підходів ризик визначається, як ймовірність:

$$R = \sum_{i=1}^n I_i \cdot N_i, \quad (1)$$

де  $I_i$  – ймовірність настання  $i$ -го виду негативної події;

$N_i$  – число цих подій.

В роботі [5] при формуванні рухомого складу з НВ, застосовано модифікований підхід:

$$R = U \cdot \sum_{a=1}^l \bar{E}(w_a), \quad (2)$$

де  $U$  – комплексний критерій виникнення більш серйозних наслідків у результаті аварійної ситуації;

$\bar{E}(w_a)$  – усереднені витрати, приведені на одну аварійну ситуацію;

$l$  – кількість складових аварійних ситуацій.

Відомі наступні складові витрат:

–  $E(w_1)$  – витрати, які припадають на пошкодження інфраструктури;

–  $E(w_2)$  – витрати, пов'язані із завданням шкоди довкіллю;

–  $E(w_3)$  – витрати на виплату грошової компенсації за нанесення шкоди людині (травмування, втрата працездатності, смерть).

Застосування даного визначення ризику свідчить, що в залежності від поставленої задачі і вхідних даних можливим є адаптація класичного підходу під конкретні потреби. Це означає, що методологія управління ризиками є гнучкою і може змінюватися для оптимізації результатів в залежності від особливостей завдання і характеристик даних, що аналізуються.

В світовій практиці [10, 11] для зниження ймовірності несприятливої події і наслідків від її реалізації застосовується концептуальний підхід управління ризиками або ризик-менеджмент. Ризик-менеджмент з точки зору безпеки руху на транспорті – це процес управління ризиками з метою їх мінімізації.

Згідно з ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 ризик-менеджмент включає наступні етапи:

- формування середовища;
- ідентифікація ризиків;
- аналіз ризиків;
- оцінка ризиків;
- обробка ризиків;
- моніторинг ефективності заходів мінімізації ризиків.

Формування середовища стосується процесу визначення зовнішніх та внутрішніх факторів, які можуть впливати на визначені цілі організації. На транспорті формування середовища у контексті ризик-менеджменту може включати аналіз наступних зовнішніх і внутрішніх факторів: погодні умови, стан інфраструктури, законодавча сфера і діючі нормативні акти, економічні умови, стан ТЗ, професійний рівень персоналу, операційні процеси. Даний етап закладає основу для початку роботи з ризиками, оскільки без чіткого розуміння контексту та умов, в яких працює транспортна система, ідентифікація ризиків буде неповною або неточною.

Також розглянуто поняття загальне оцінювання ризиків. Загальне оцінювання ризиків (risk assessment) – це спільний процес ідентифікації (risk identification), аналізу (risk analysis) та оцінки ризиків (risk evaluation). Важливим є зазначити, що загальне оцінювання ризиків можна застосовувати, як на рівні організації, підрозділів, проектів, так і на рівні окремих видів діяльності, процесів або навіть конкретних ризиків.

Ідентифікація ризиків – це процес пошуку, розпізнавання і опису ризиків. Процес ідентифікації полягає у визначенні причин і джерел ризиків, подій, ситуацій та обставин, які можуть впливати на досягнення цілей складних систем чи організацій, а також визначити характер цього впливу. Для даного етапу характерно використання методів статистичного аналізу; системних методів групової роботи, коли група експертів визначає небезпечні події та ризики за допомогою структурованих питань; методів експертних оцінок або «мозкового штурму». Головною метою етапу є ідентифікація якомога більшої кількості ризиків.

Для поглиблення розуміння ідентифікованих ризиків, отримання вхідних даних для оцінки і визначення стратегій по їх мінімізації необхідним є процес аналізу. Даний етап ризик-менеджменту передбачає розгляд джерел ризиків, причин виникнення, їх наслідків та ймовірностей виникнення цих наслідків. Для реалізації цього етапу можна використовувати кількісні, напівкількісні, якісні методи, та/або їх комбінацію.

Наступний етап, оцінка передбачає порівнювання кількісно оцінених рівнів ризиків з тими критеріями, які були визначені під час формування середовища, тобто приймається рішення по визначенню пріоритетності ризиків.

Після загального оцінювання проводиться обробка ризиків, даний етап ще можна назвати безпосередньо управлінням, і полягає він у розробці і впровадженні стратегій і заходів, які можуть змінити ймовірність виникнення та вплив ризиків у вигляді негативних наслідків. Після цього етапу виконують циклічне повторне загальне оцінювання нового рівня ризику для визначення його допустимості по відношенню до попередньо встановлених критеріїв.

Моніторинг ефективності заходів мінімізації ризиків дає змогу актуалізувати та вдосконалити загальне оцінювання ризиків, що стає необхідним з часом. Даний етап забезпечує постійне відстеження ефективності впроваджених заходів з управління ризиками, а також дозволяє виявити нові потенційні ризики, які могли виникнути в результаті змін у зовнішньому чи внутрішньому середовищі. Крім того, він допомагає своєчасно коригувати впровадженні стратегії управління ризиками, підвищуючи їх ефективність та відповідність актуальним умовам і викликам.

Схема ризик-менеджменту зображена на рисунку 1.

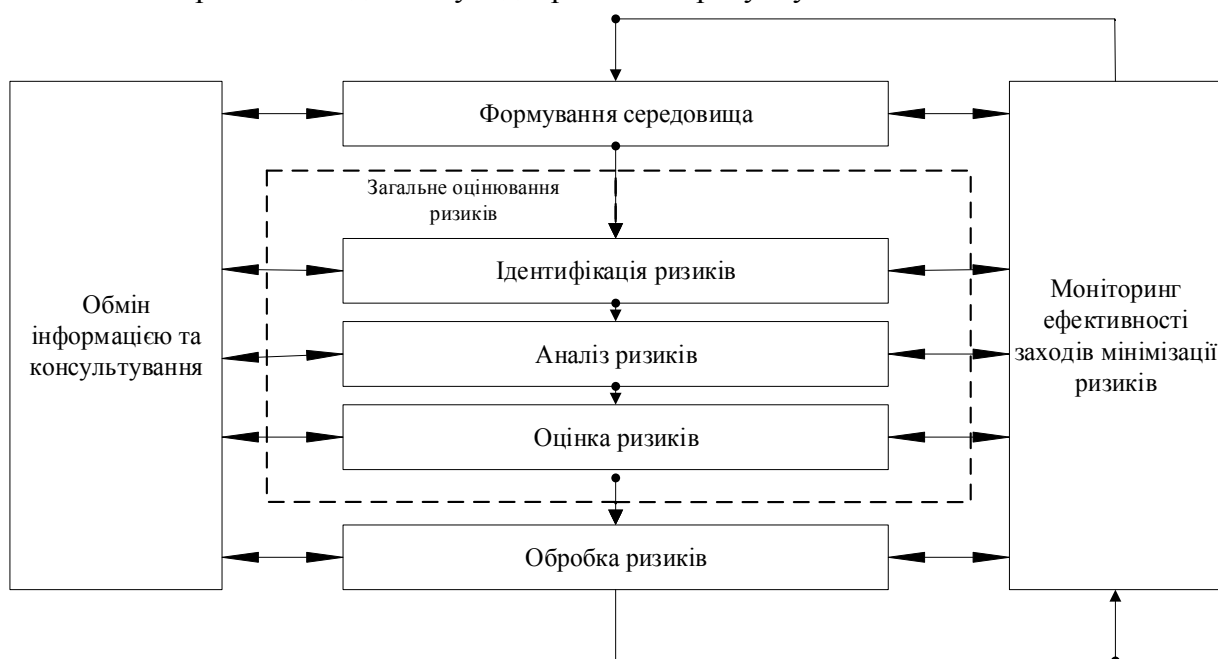


Рисунок 1 – Процес ризик-менеджменту

Джерело: розроблено автором на підставі ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013

В схемі наведено поняття обміну інформацією та консультування, яке проводиться на всіх етапах ризик-менеджменту і від якого залежить успішність загального оцінювання.

Також необхідним є відмітити важливість ведення документації в процесі загального оцінювання ризиків та для фіксування його результатів. Для цієї мети використовують реєстр ризиків, ступінь його звітності, як правило залежить від цілей і сфери застосування загального оцінювання. Реєстр ризиків дозволяє систематично зберігати інформацію про виявлені ризики, їх характеристики, можливі наслідки та заплановані заходи з управління. Ведення такої документації сприяє прозорості процесу прийняття рішень, підвищує відповідальність учасників, а також дає змогу аналізувати ефективність прийнятих заходів та адаптувати підходи до управління ризиками у майбутньому.

Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту на автомобільному транспорті є важливим для досягнення цілей підвищення рівня безпеки перевізного процесу на дорогах. Даний підхід дозволяє комплексно підійти до вирішення питання безпеки, враховуючи різні аспекти та їх взаємодію, які можуть впливати на ризики: від технічного стану ТЗ та інфраструктури до компетенції водіїв і зовнішніх факторів, таких як погодні умови. Комплексність підходу забезпечується тим, що він включає не лише загальне оцінювання ризиків, але й розробку превентивних заходів, які дозволяють зменшити ймовірність виникнення несприятливих ситуацій. Такі заходи, включають, у тому числі, інтелектуалізацію перевізного процесу. Це, в свою чергу, передбачає використання сучасних технологій, таких як системи автоматичного контролю руху ТЗ, системи попередження про небезпеку, інтелектуальні транспортні технології, що зменшить вплив «людського фактору» і є дуже актуальним на сьогоднішній день.

Важливість впровадження ризик-менеджменту на автомобільному транспорті обумовлена необхідністю підвищення загальної безпеки руху, зменшення кількості ДТП і мінімізації їх наслідків, включно з травмуванням людей і матеріальними збитками. Для цього слід застосовувати систему постійного моніторингу, яка дозволить актуалізувати дані про ризики та вдосконалювати підходи до керування ними, залежно від змін зовнішніх і внутрішніх факторів. Слід враховувати як загальні фактори ризику, так і специфічні – для конкретних умов або регіонів, що буде дозволяти адаптувати заходи з урахуванням місцевих характеристик та особливостей території.

Реалізація концептуального підходу ризик-менеджменту на автомобільному транспорті потребує також ефективної комунікації та консультування між усіма зацікавленими сторонами, такими як дорожні служби, органи державного управління, страхові компанії та оператори транспорту. Це дозволить об'єднати зусилля в напрямку забезпечення безпеки та ефективно реагувати на виявлені ризики. Застосування цього підходу забезпечить системність та безперервність процесу управління безпекою, зробить його прозорим і зрозумілим для всіх учасників.

Для ефективного застосування ризик-менеджменту доцільним є узгодження його підходів із законодавчою сферою. Законодавство визначає вимоги до безпеки на транспорті, включно з обов'язковими стандартами, процедурами, яких повинні дотримуватись всі учасники транспортного процесу. Узгодженість концепції до зазначених вимог дозволить уникнути штрафів, санкцій і потенційних конфліктів із регулюючими органами.

Крім зазначеного, в процесі управління ризиками є оперативне реагування на зміни нормативних вимог законодавства, зміни зовнішніх і внутрішніх факторів: таких як економічна ситуація, технологічні нововведення, зміни в умовах експлуатації ТЗ та ін. Така гнучкість підходу забезпечить актуальність, ефективність прийнятих заходів та дозволить своєчасно адаптувати стратегії управління ризиками для підтримки належного рівня безпеки перевізного процесу.

**Висновки:** 1. З'ясовано, що для підвищення рівня безпеки перевізного процесу на авіаційному, залізничному та автомобільному транспорті можливе застосування ризик-орієнтованих підходів. Виявлено, що впровадження систем управління ризиками дозволяє точно визначати пріоритетні зони для покращення показників безпеки, зменшити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій та мінімізувати наслідки від їх реалізації.

2. На основі ІЕС/ISO 31010:2013 сформовано засади для впровадження концептуального підходу ризик-менеджменту та його основних етапів: формування середовища; загальне оцінювання ризиків (ідентифікація, аналіз, оцінка); обробка

ризиків; моніторинг ефективності заходів мінімізації ризиків. Визначено, що запропонований підхід є комплексним, гнучким і адаптивним, що робить його придатним для ефективного застосування на різних видах транспорту.

3. Обґрунтовано можливості впровадження ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на автомобільному транспорті з урахуванням специфіки його роботи. Показано важливість інтелектуалізації перевізного процесу при управлінні ризиками та необхідність його узгодження з чинним законодавством.

## Список літератури

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: веб-сайт. URL: [https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National\\_Transport\\_Strategy\\_2030.pdf](https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_Strategy_2030.pdf) (дата звернення 20.09.2024).
2. Canale S., Distefano N., Leonardi S. A risk assessment procedure for the safety management of airport infrastructures, 2004. URL: [https://www.researchgate.net/publication/237831304\\_A\\_risk\\_assessment\\_procedure\\_for\\_the\\_safety\\_management\\_of\\_airport\\_infrastructures](https://www.researchgate.net/publication/237831304_A_risk_assessment_procedure_for_the_safety_management_of_airport_infrastructures) (дата звернення 22.09.2024).
3. Esmaeeli N., Sattari F., Lefsrud L., Macciota R. Assessing the risk associated with the Canadian railway system using a safety risk model approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2023. Vol. 2678, Issue 2. P. 1-14. DOI: 10.1177/03611981231176549
4. Lavrukhin O., Kovalov A., Kulova D., Panchenko A. Formation of a model for the rational placement of cars with dangerous goods in a freight train. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 28–35. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.103
5. Lavrukhin O., Kovalov A., Schevcenko V., Kyman A., Kulova D. Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 3 (98). P. 25–31. DOI: 10.15587/1729–4061.2019.163442
6. Shanchuan Y., Yi L., Zhaoze X., Yishun L., Gang L., Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials Based on GRU-DNN with Multimodal Feature Embedding. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Issue 21. P. 1-21. DOI: 10.3390/app12211130
7. ISO 31073:2022 Risk management Vocabulary. Geneva: ISO, 2022. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:79637:en> (дата звернення 22.09.2024).
8. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT), Мінекономрозвитку України. Київ, 2015. 73 с.
9. Oxford English Dictionary. М. : Oxford University, 2010. 920 с.
10. Пайнтер К., Даллас Т. Ризик-менеджмент в проектах: [пер. з англ.]. Київ: Видавничий дім «БУКВИ», 2019. 408 с.
11. Ayyub B.M. Risk Analysis in Engineering and Economics. New York, Springer, 2003. 446 p.

## References

1. Natsional'na transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku [National transport strategy of Ukraine for the period until 2030: website]. Retrieved from: [https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National\\_Transport\\_Strategy\\_2030.pdf](https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_Strategy_2030.pdf) (Last accessed: 20.09.2024) [in Ukrainian].
2. Canale, S. Distefano, N. & Leonardi, S. (2004). A risk assessment procedure for the safety management of airoport airoport infrastructures Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/237831304\\_A\\_risk\\_assessment\\_procedure\\_for\\_the\\_safety\\_management\\_of\\_airport\\_infrastructures](https://www.researchgate.net/publication/237831304_A_risk_assessment_procedure_for_the_safety_management_of_airport_infrastructures) (Last accessed: 22.09.2024) [in English].
3. Esmaeeli, N. Sattari, F. Lefsrud, L. & Macciota, R. (2023). Assessing the risk associated with the Canadian railway system using a safety risk model approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.. Vol. 2678, Issue 2. P. 1-14. DOI: 10.1177/03611981231176549 [in English].
4. Lavrukhin, O. Kovalov, A. Kulova, D. & Panchenko, A. (2019). Formation of a model for the rational placement of cars with dangerous goods in a freight train. *Procedia Computer Science*. Vol. 149. P. 28–35. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.103 [in English].
5. Lavrukhin, O. Kovalov, A. Schevcenko, V. Kyman, & A. Kulova, D. (2019). Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, Issue 3 (98). P. 25–31. DOI: 10.15587/1729–4061.2019.163442 [in English].

6. Shanchuan, Y. Yi, L. Zhaoze, X. Yishun, L. & Gang, L. (2022). Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials Based on GRU-DNN with Multimodal Feature Embedding. *Applied Sciences*. Vol. 12, Issue 21. P. 1-21. DOI: 10.3390/app122111130 [in English].
7. ISO 31073:2022 Risk management Vocabulary. (2022). Geneva: ISO. Retrieved from: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:79637:en> (Last accessed: 22.09.2024) [in English].
8. DSTU IEC/ISO 31010:2013. (2015). Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku (IEC/ISO 31010:2009, IDT) [Risk management – Risk assessment techniques (IEC/ISO 31010:2009, IDT)]. Minekonomrozvytku Ukrainy. Kyiv - Ministry of Economic Development of Ukraine. Kyiv. 73 p. [in Ukrainian].
9. Oxford English Dictionary. (2010) . M. Oxford University. 920 p.
10. Painter, K. & Dallas, T. (2019). Rizyk-menedzhment v proiektakh: [Risk Management in Projects]. Kyiv: Vydavnychiy dim «BUKVI» - Kyiv: Publishing House «BUKVI». 408 p. [in Ukrainian].
11. Ayyub, B.M. (2003). Risk Analysis in Engineering and Economics. New York, Springer. 446 p. [in English].

**Daria Kulova**, DSc, Senior Lecturer

*Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine*

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Application of a Conceptual Risk Management Approach in the Field of Traffic Safety in Transport**

The article examines the conceptual approach to risk management aimed at ensuring traffic safety in various types of transport, including automotive, railway, and aviation. The main focus is on the application of risk-oriented approaches to enhance the level of transport safety and reduce negative environmental impacts. It was found that the implementation of risk management systems not only reduces the likelihood of hazardous situations but also minimizes the negative consequences of their occurrence, including economic and social losses.

The principles for implementing a conceptual risk management approach have been established, including defining its main stages: establishing the context, risk assessment (identification, analysis, evaluation), risk treatment, and monitoring the effectiveness of risk mitigation measures. The importance of maintaining a risk register for data systematization and user convenience is highlighted. The interconnection between the stages of risk management is outlined, as well as the importance of information exchange and consultation at each stage, which contributes to the effectiveness of risk mitigation measures.

Special attention is paid to the opportunities for implementing risk management in the field of road traffic safety, considering its operational specifics and the requirements of current legislation. The importance of the intellectualization of the transport process is shown as a means of enhancing the efficiency of risk management. The proposed approach envisages effective interaction between all stakeholders, which not only improves safety but also achieves the economic efficiency of transport operations. It is determined that the comprehensive, flexible, and adaptive nature of the risk management approach promotes its universal application in various sectors, particularly in transport, to reduce the number of road traffic accidents and minimize their consequences.

**risk management, transport safety, road transport, general risk assessment, risk-based approaches, transportation process**

*Одержано (Received) 03.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 656.01:658.286:656.13

DOI: [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)

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **С.Ю. Тищенко**, асп., **А.В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук

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

## Інноваційні рішення в складській логістиці

В статті розглядаються сучасні тенденції в складській логістиці, такі як автоматизація, цифровізація, омніканальність, екологічна сталість та зростання електронної комерції. Основні проблеми галузі включають високі витрати на автоматизацію, недостатню кваліфікацію персоналу для роботи з інноваційними технологіями, складнощі адаптації до глобальних змін у ланцюгах постачання та необхідність дотримання екологічних стандартів. Проведено аналіз останніх досліджень щодо використання інтелектуальних систем, великих даних, штучного інтелекту та Інтернету речей для оптимізації складських операцій. Розроблено заходи інноваційного підходу для підвищення ефективності управління складськими процесами та конкурентоспроможності складських підприємств і комплексів. Запропоновано підходи для оцінки впливу новітніх технологій на управління складською логістикою та досягнення сталого розвитку складського господарства.

**склад, логістика, інновація, технологія, управління, інтелектуальні системи**

**Постановка проблеми.** Проблеми сучасних тенденцій в складській логістиці пов'язані з низкою викликів та можливостей, що виникають у контексті глобалізації, цифровізації та змін у споживчій поведінці [1]. Ключовими аспектами та проблемами, з якими стикається складська логістика в сучасних умовах, є наступні:

- автоматизація та роботизація;
- цифровізація та великі дані;
- глобалізація та зміна ланцюгів постачання;
- екологічні виклики та сталість;
- зростання електронної комерції;
- омніканальність.

Сучасні технології дозволяють значно підвищити ефективність складів та їх комплексів завдяки автоматизованим системам управління, роботам та дронам. Однак це вимагає значних інвестицій, що є проблематичним для малих і середніх підприємств. При цьому основною проблемою є високі початкові витрати на автоматизацію та інтеграцію нових технологій. Наявний також ризик, який полягає у неправильному впровадженні або обслуговуванні автоматизованих систем, що може призвести до збоїв у роботі складу та складських комплексів.

Зростання обсягів інформації, яку обробляють підприємства, фірми, компанії, вимагає вдосконалення систем управління складськими процесами та господарством. В даній ситуації цифрові інструменти допомагають краще відстежувати запаси, прогнозувати попит і оптимізувати ресурси. В той час вимагається необхідність адаптації до нових технологій, таких як Інтернет речей (IoT) і штучний інтелект (ШІ) [2]. На практиці стикаються з недостатньою кваліфікацією персоналу для роботи з цифровими інструментами та управлінням великими даними.

На сьогодні глобалізація змінює структуру логістичних мереж, що вимагає від складів та складських комплексів швидкого реагування на зміни у світовій економіці,

пов'язані з коливаннями цін на енергію, політичну нестабільність або природні катастрофи. Це обумовлює проблему складності адаптації до змін у глобальних ланцюгах постачання і ризик перебоїв в постачанні, що не може не вплинути на роботу складських комплексів.

Оскільки сучасні тенденції зосереджуються на зниженні вуглецевого сліду та екологічних впливах, то в складській практиці слід приділити увагу використанню екологічних матеріалів для пакування, та зниження енергоспоживання складів. Це свідчить про необхідність вкладу значних інвестицій у модернізацію складів та їх комплексів, щоб відповідати чинним екологічним стандартам. Недотримання екологічних норм може призвести до штрафів і втрати конкурентоспроможності.

Останнім часом зростання електронної комерції призводить до зміни вимог до функціонування складів та їх комплексів. При цьому більше уваги слід приділяти обробці індивідуальних замовлень, що ускладнює управління запасами та доставку товарів(вантажів). Це викликає необхідність швидкого реагування на зростання обсягів замовлень, особливо в пікові періоди. Затримки в обробці обсягів замовлень можуть призвести до втрати клієнтів [3,11].

Спостережувана тенденція омніканальності функціонування складів та їх комплексів, вимагає від них гнучкості у роботі з різними каналами збуту — від роздрібних магазинів до електронної комерції. Це ускладнює управління запасами та процесами виконання замовлень, а тому є потреба в інтеграції всіх каналів збуту в єдину логістичну систему. Якщо інтеграція каналів збуту неперспективна, то це може призвести до плутанини в управлінні запасами та виникненню незадоволення клієнтів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень і публікацій, що стосується учасних тенденцій в складській логістиці свідчить про значний інтерес до проблем автоматизації, цифровізації, сталого розвитку та омніканальності [2]. В публікаціях відображаються як наукові, так і практичні підходи вирішення нових питань і завдань, пов'язаних із глобалізацією, зростанням електронної комерції та розвитком сучасних технологій в складській логістиці.

Автоматизація є одним з основних напрямків досліджень. Роботизація складів та автоматизовані системи управління запасами дозволяють суттєво скоротити витрати на обробку товарів та підвищити ефективність операцій. Згідно з доповіддю McKinsey (2022) [4], рівень автоматизації складів зростає, і до 2030 року 50% усіх складів можуть бути повністю автоматизованими [5,25,26]. У доповіді також акцентується на важливості інвестицій у роботизовані системи для великих компаній, а також на ризики для малого та середнього бізнесу через значні початкові витрати. Компанії Amazon та Alibaba активно впроваджують роботи для виконання складських операцій, що дозволяє прискорити процеси збору вантажів(товарів) та їх пакування.

Дослідження у цій галузі цифровізації зосереджуються на використанні великих даних, штучного інтелекту (ШІ) та Інтернету речей (IoT) для оптимізації процесів управління функціонування складом та складськими комплексами [2,27,28].

У звіті PwC (2023) [6] досліджується роль цифрових рішень у логістиці. Показано, що підприємства, фірми, компанії, які впроваджують аналітику великих даних та ШІ для прогнозування попиту, можуть скоротити втрати через надлишок або нестачу товарів на 10...20% [7,26]. При цьому програмне забезпечення для управління складом WMS дозволяє підприємствам, фірмам, компаніям краще контролювати запаси, покращувати точність обліку та підвищувати продуктивність персоналу, задіяних в роботі складських господарств і комплексів [8,29,30].

Тенденція до екологічної сталості є важливою темою в сучасній складській логістиці. У багатьох дослідженнях підкреслюється потреба у зменшенні вуглецевого

слідів та екологічних впливів [9]. Згідно з публікацією Harvard Business Review (2023) [10,13], підприємства, фірми, компанії, що впроваджують стратегії сталого розвитку, зокрема використання відновлюваних джерел енергії для складів, можуть знизити операційні витрати та покращити репутацію бренду [9,10]. Скандинавська мережа магазинів IKEA, яка в 2017 році мала 411 магазинів в 49 країнах, в тому числі в Україні, створює "зелені склади", що використовують енергію від сонячних панелей та впроваджує екологічно чисті матеріали для пакування товарів (вантажів) [12-15].

Зростання обсягів онлайн-замовлень в електронній комерції викликає великий інтерес у дослідженнях щодо управління складськими операціями. У звіті Gartner (2023) зазначено, що до 2025 року майже 70% складів будуть спеціально адаптовані для виконання індивідуальних замовлень електронної комерції [16]. Це потребує нових підходів до управління запасами та збільшення швидкості обробки замовлень. Усі основні гравці ринку електронної комерції, такі як Amazon, Walmart, та інші, впроваджують багатоканальні стратегії, щоб забезпечити швидке обслуговування клієнтів та мінімізувати час доставки товарів [21,22].

Значна увага приділяється інтеграції омніканальних систем для забезпечення єдиного процесу управління продажами через різні канали (онлайн і офлайн). Дослідження, проведене Deloitte (2022) [17], вказує на те, що омніканальні склади з єдиною інтегрованою системою управління запасами дозволяють підприємствам, фірмам, компаніям краще управляти попитом споживачів і мінімізувати витрати на транспортування [23,24]. Багато ритейлерів (наприклад, Target, Zara) активно інтегрують онлайн та офлайн системи для підвищення якості обслуговування клієнтів і скорочення часу доставки товарів.

Цифровізація та автоматизація підвищують потребу в дослідженнях щодо захисту даних і кібератак на логістичні системи [18]. Згідно зі звітом Cybersecurity Ventures (2023) [25], складські логістичні системи стають ціллю для кібератак, особливо через зростання використання IoT-пристроїв. Необхідність впровадження надійних систем кіберзахисту є критичною для сучасних складів [12,13,19,20].

Таким чином, в даній роботі передбачається комплексне дослідження сучасних тенденцій у складській логістиці та надання практичних рекомендацій для бізнесу щодо підвищення їх ефективності в умовах швидких змін.

**Постановка завдання.** Метою завдання є розробка інноваційних рішень підвищення продуктивності та конкурентоспроможності логістичних складських господарств та комплексів на підприємствах, фірмах, компаніях.

Для реалізації мети в даній роботі розв'язуються наступні завдання:

1. Дати аналіз ключових тенденцій, що відбуваються у сфері складської логістики, та свідчить про їх ефективність.

2. Визначити проблеми та виклики, які постають перед складськими логістичними системами та комплексами в умовах швидкого розвитку ринку та глобальних змін, впровадженням інноваційних технологій, адаптації їх функціонування до нових умов роботи та забезпечення кібербезпеки.

3. Виявити вплив новітніх технологій на ефективність управління складськими операціями та оптимізацію процесів зберігання, транспортування і обробки товарів та розробити метод оцінювання цього впливу.

4. Вивчити екологічні вимоги та їх вплив на операційну діяльність складів та з'ясувати шлях досягнення сталого розвитку у складській логістиці.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо [1,5,9,20], що у логістиці прийнято вважати, що чим краще налагоджені складські системи і комплекси, тим більше товарообіг, вище рентабельність обігового капіталу і відповідно більше обігових

коштів. На підприємствах, фірмах, компаніях, складські системи і комплекси можуть працювати більш ефективно, що дає їм нові ринкові можливості.

Ефективне управління складським господарством вимагає ретельного планування, яке включає визначення розташування стелажів для зберігання, зон навантаження та розвантаження, а також вибір відповідного обладнання. Це безпосередньо впливає на продуктивність складських операцій. Наприклад, якщо часто використовуваний товар знаходиться далеко від зон прийому і відвантаження, на його переміщення витрачається багато часу. Крім того, для ефективного контролю роботи складу важливо здійснити оптимізацію складських логістичних процесів.

На сьогодні позитивному розвитку складської логістики перешкоджають наступні фактори:

- відсутність кваліфікованих кадрів;
- слабка логістична інфраструктура складських систем і комплексів;
- застарілі технології складської логістики;
- недостатнє розуміння керівництвом підприємств, фірмах, компаній логістичних складських проблем;
- недостатня база знань логістичного управління складськими системами та комплексами, особливо це стосується впровадження інтелектуальних елементів.

Під час проектування складу завдання аналізу складської роботи вирішують за допомогою аналітичних методів, заснованих передусім на середніх величинах добових товаропотоків прибуття та відправлення товарів. Однак ці потоки є величинами змінними, оскільки вони залежать від численних факторів організаційного, технологічного, фінансового, юридичного характеру.

На практиці при проектуванні складських систем і комплексів, зазвичай застосовується аналітичний метод оцінки за середніми величинами товаропотоків та запасів зберігання.

При цьому спочатку визначають середній добовий товаропотік, палети/добу:

$$\bar{Q}_{\text{дб}} = \frac{Q_{\text{рв}}}{T_{\text{р}}} \quad , \quad (1)$$

де  $Q_{\text{рв}}$  – річний товаропотік (річна переробна здатність складу), палети/рік;

$T_{\text{р}}$  – кількість діб роботи складу на рік, діб/рік.

Запаси зберігання та необхідна ємність складу визначаються з використанням середнього терміну зберігання вантажів  $T_{\text{зб}}$ , на добу:

$$\bar{R}_{\text{зб}} = \frac{Q_{\text{рв}}}{T_{\text{зб}}} \quad , \quad (2)$$

У ланцюгах постачань наявними є склади різного типу та призначення, для яких за досвідом їх проектування та експлуатації існують певні нормативні терміни зберігання  $T_{\text{зб}}$ . Для складів матеріально-технічного постачання промислових підприємств  $T_{\text{зб}}$  становить 20...25 діб, для виробничих технологічних складів промислових підприємств – від 4...6 годин до 1 доби, для складів готової продукції промислових підприємств – 3...5 діб, для оптових торгових складів – 30...40 діб, для складів роздрібної торгівлі – 5...10 діб, для складів експедиторських компаній – 5...15 діб, для перевалочних складів на магістральному транспорті – 2...7 діб, для складів сезонних товарів – до 180 діб.

Страховий запас товарів для постачального складу визначається як різницю максимальної видачі товарів за добу та мінімального їх прибуття:

$$I_{c3} = \max(S_j = 1.2m) - \min(q_v, i = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

При цьому розглядають всі можливі поєднання прибуття та відправлення товарів зі складу та по кожному поєднанню визначають запас зберігання товарів та ймовірність цього запасу. Величину запасу зберігання для кожного  $k$ -го поєднання добових товаропотоків прибуття та відправлення товарів, визначають таким чином:

$$I_k = I_{c3} + q_k - S_k, \quad (4)$$

де  $I_{c3}$  – страховий запас товарів, палет;

$q_k$  – добовий товаропотік прибуття в  $k$ -ту добу, палет;

$S_k$  – добовий товаропотік відправлення в  $k$ -ту добу, палет.

Імовірність запасу зберігання товарів на  $k$ -у добу визначається за формулою добутку ймовірностей двох незалежних випадкових подій:

$$P_k = a(q_k) \cdot B(S_k). \quad (5)$$

Шуканий запас зберігання товарів на складі визначається як математичне очікування всіх можливих поєднань добових товаропотоків прибуття та відправлення товарів, число яких дорівнює  $n \cdot m$ .

Поповнення запасів тягне за собою фінансові вкладення. При досягненні оптимального співвідношення між необхідним рівнем запасів та витратами обчислюють економічний розмір замовлення (economic order quantity) за формулою:

$$EOQ = \frac{2A_{вв}D_{pn}}{V_{нвв}R_{св}}, \quad (6)$$

Де  $D_{pn}$  – рівень попиту,  $A_{вв}$  – виробничі витрати,  $R_{св}$  – складські витрати,  $V_{нвв}$  – величина питомих виробничих витрат [26,27].

Крім того, потрібно також врахувати наступні фактори:

- стрибкоподібне збільшення товарного попиту протягом усього терміну його реалізації;
- непостійність термінів поповнення запасів;
- політика, що проводиться підприємством, фірмою, компанією щодо обслуговування своїх клієнтів.

Розрахунок та аналіз складських систем та комплексів необхідно проводити тільки в сукупності з роботою суміжних підрозділів: постачання, продажу, сервісу, транспорту та ін.

Для ефективного запуску організації складського господарства, перш за все, важливо визначити пріоритетні ключові показники ефективності. Це можна зробити, уточнюючи та перевіряючи стратегічні та оперативні цілі підприємства, фірми і компанії. Мета повинна бути сформульована таким чином, щоб не обов'язково відображати фінансовий показник як основний критерій успішності. Пріоритетні показники ефективності зведені до таблиці 1.

Після сформулювання цілей складської логістики підприємства, фірми, компанії, матеріальні потоки на складах мають бути організовані за допомогою технологічних операцій, що базуються на кількох ключових показниках:

1. Швидкість обороту товарів відображає те, як часто за звітний період поповнюється і вичерпується запас на складі. Його нормативний показник визначається залежно від функціональних особливостей складу та умов постачання. Збільшення оборотності досягається автоматизацією процесів та підвищення продуктивності

робітників складського комплексу.

2. Безпека споживчих властивостей товарів є ключовою для складської логістики. Цей показник визначається порівнянням втрат через природні фактори і технічні недоліки. Технологічні процеси, матеріально-технічна база підприємства, фірми, компанії, та якість упаковки впливають на збереження товарів на складі.

3. Економічність складських технологічних процесів вимірюється витратами на обробку середнього обсягу товарів. Оптимізація цього показника досягається через удосконалення всієї системи переміщення товарів, що впливає на ефективність ланцюга постачання через зменшення загальних витрат на переміщення матеріальних цінностей.

Таблиця 1 – Ключові показники ефективності управління складом на підприємстві, фірмі, компанії

| Найменування ключових показників      | Методика розрахунку показників по групах                                                         | Одиниці виміру |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Група "Якість"                        |                                                                                                  |                |
| Частка виконаних замовлень            | Частка виконаних замовлень без рекламаций через склад                                            | 95%            |
| Норматив на обробку рекламаций товару | Середній встановлений час на опрацювання рекламаций якості складських операцій                   | 10 днів        |
| Група "Ефективність процесів"         |                                                                                                  |                |
| Продуктивність персоналу складу (KPI) | Середня кількість замовлень, відвантаженого складом, за одиницю робочого часу у звітному періоді | 500Зам./змінa  |
| Норматив на оприбуткування товару     | Середня кількість часу, витраченого на оприбуткування нормативної кількості товару               | 8 год/добa     |
| Група "Недоліки"                      |                                                                                                  |                |
| Собівартість складських операцій      | Середня собівартість обробки одиниці товару (по відвантаженню)                                   | грн./шт.       |

Джерело: розроблено авторами на підставі [17]

У методології логістичної оптимізації складів підприємств, фірм, компаній широко використовується правило Паретто. Іноді це правило називають Закон 80/20. На базі правила Паретто 80/20 будується ціла галузь математичного аналізу, тобто ABC-аналіз [22]. В основі цього аналізу лежить поділ об'єкта аналізу на три групи за ступенем їх важливості та ефективності за певним критерієм.

У складській логістиці методики реалізації аналізу 80/20 та ABC є аксіомами. На практиці дуже добре працюють у практичному застосуванні наступні співвідношення:

- 20% товарів мають 80% товарного запасу;
- 20% операцій мають 80% трудомісткості складської товаропереробки;
- 20% клієнтів приносять 80% обороту підприємства, фірми, компанії.

На основі ABC-аналізу за критерієм "кількість звернень до товару" будується стратегія розміщення товару за адресними осередками складу. При цьому оптимізацію складської логістики необхідно проводити, використовуючи поділ товарів, контрагентів на класифікаційні групи по ABC-аналізу, з метою оптимального розподілу ресурсів і витрат. Щоб оптимізувати склад потрібно оптимізувати кожен ланку у складському логістичному ланцюзі постачання, тобто, необхідна оптимізація кожного з

бізнес-процесів, кожної операції рівня дій, кожного співробітника складу.

Оптимальна робота складу та його параметри повністю залежать від суміжних ланок ланцюга постачань: процесів закупівлі та продажу товару. Усі логістичні процеси ланцюга мають бути чітко пов'язані, скоординовані, синхронізовані, регламентовані та нормовані.

Оптимізація складу здійснюється для досягнення наступних результатів:

- зниження складських витрат;
- підвищення рівня сервісу складу;
- підвищення продуктивності праці;
- автоматизація складу.

Оптимізація витрат – це не мінімізація, а пошук оптимальної величини у витратах для забезпечення роботи складу із заданим рівнем якості та продуктивності праці. Рівень обслуговування клієнтів є основною конкурентною перевагою підприємства, фірми, компанії. Дуже часто склад стає "вузьким місцем" у підприємстві, фірмі, компанії, що не дозволяє збільшувати обсяги продажу. Автоматизація складу здійснюється за допомогою програмного забезпечення управління складом, WMS. Будь-яка система WMS потребує розробки алгоритму для налаштування та доопрацювання. Потрібно чітко розуміти, що система WMS – це лише програмний інструмент, яким необхідно навчитися користуватись. Перед використанням будь-якої системи WMS необхідно розробити оптимальний алгоритм роботи складу у вигляді логістичної бізнес-моделі з логічно описаних складських бізнес-процесів.

Оптимізація складської логістики передбачає проведення наступних заходів:

1. Вилучення застарілого обладнання та матеріалів.

Швидкий технологічний розвиток призводить до накопичення застарілих апаратів та обладнання у більшості промислових підприємств, фірм і компаній. Щоб звільнити простір і заощадити кошти, рекомендується відмовитися від цих ресурсів. Продаж такого майна може також приносити певні фінансові вигоди.

2. Реалізація залишків непроданих товарів.

Надмірно заповнені склади не лише не приносять доходу, а й вимагають додаткових витрат. Важливо провести аналіз усіх товарів і визначити, які з них вже вважаються неліквідами, оскільки критерії цього поняття можуть варіюватися. Також варто вивчити причини нагромадження цих товарів і вжити заходів для запобігання їх подальшому накопиченню.

3. Зменшення витрат на персонал.

Спочатку необхідно з'ясувати, які конкретно обов'язки виконують співробітники відділу складської логістики і складу. Це може здійснюватися за допомогою фотозйомки під час робочого процесу. Однак варто уникати масштабних звільнень та спочатку розглядати можливості оптимізації та змін у роботі персоналу, а також звільняти лише тих працівників, чия робота не пов'язана з основними завданнями відділу.

4. Оптимізація запасів.

Багато підприємств, фірм і компаній неефективно управляють запасами, підтримуючи надмірні обсяги товарів на складах для уникнення можливого дефіциту. Ефективне управління запасами є критичним для забезпечення їх економічної стабільності.

5. Розробка ефективної системи управління запасами.

Основне завдання логістики – це створення ефективної системи управління запасами. Керівництво може розглядати можливість самостійного розроблення такої системи або звернутися за консультацією до спеціалістів у цій області. Для успішної

реалізації проєкту ефективної системи управління запасами необхідно виконати наступні кроки:

- класифікувати складську продукцію (методика ABC/XYZ);
- розрахувати обсяг і рівень запасів без нестачі і надлишку товарів;
- визначити політику управління закупок у кожному разі;
- розробити способи контролю і планування поповнення резервів.

Економічний прорив забезпечує оптимізацію і контроль не лише у сфері запасів продукції і управління складською логістикою у постачальників.

#### 6. Відповідність категорії складу потребам підприємства, фірми, компанії.

Існують різні категорії складів, наприклад категорії А. В той час далеко не всякий товар потребує використання саме цих приміщень. Іноді це просто розкіш. Однак, надмірна економія на тому, якого рівня склад підприємство може призвести до суттєвих втрат:

- буде зіпсований товар, оскільки опиниться у невідповідних умовах зберігання;
- недостатньо кваліфіковані працівники складу можуть також призвести до непридатності продукції;
- у сховищах з поганою системою обліку товарів та лінивою охороною часто відбуваються розкрадання товарів;
- помилки в процесі формування замовлень можуть призвести до штрафів та конфліктів із клієнтами;
- вибрати не тільки приміщення, а й все обладнання та машини лише відповідно до логістичних цілей.

#### 7. Ефективне розміщення запасів на складі.

Ефективне розміщення запасів на складі є ключовим аспектом складської логістики, який потребує детального аналізу умов зберігання товарів. Часто товари, які не рухаються, займають цінне місце, тоді як швидкозростаючі товари розташовуються стратегічно. Щоб оптимізувати роботу складу, підвищити використання його потужностей та поліпшення комплектування замовлень, необхідно переглянути систему розміщення товарів відповідно до їх класифікації. Розумне зонування забезпечує оптимізацію процесів на підприємстві.

#### 8. Поліпшення якості роботи персоналу.

Поліпшенням якості роботи персоналу є важливою складовою організації складської логістики підприємства, що відповідає японській практиці кайдзен. Якщо персонал відчуває, що його ідеї важливі, це надає керівництву цінну інформацію для оптимізації процесів. Співробітники можуть самі сприяти зменшенню помилок, покращенню обслуговування, прискоренню роботи та зниженню витрат.

#### 9. Задокументування усіх нововведень та прописання їх у регламенті.

Після завершення оптимізації складської логістики важливо задокументувати всі нововведення та прописати їх у регламенті. Слід також визначити час і процедури прийому та відправлення товарів, розподіл персоналу за зонами, та необхідно провести навчання для персоналу.

Більшість сучасних складських комплексів використовують системи управління складом WMS, які отримують інформацію від штрих-кодів і RFID-міток на товарах. На вищому рівні працюють системи контролю складу WCS, що відслідковують не тільки товари, але й роботу складського обладнання за допомогою сенсорів. Дані цих систем допомагають оптимізувати складські процеси (рис.1). Окремі склади впроваджують системи автоматизації будівель BAS, що керують освітленням, вентиляцією, кондиціонуванням, а також забезпечують безпеку та контроль доступу.

Сучасні системи WMS, WCS і BAS мають інтерактивні дашборди, які

дозволяють складським операторам ефективно керувати процесами. Технології Інтернету речей (IoT) об'єднують дані цих систем, забезпечуючи їхню взаємодію для вирішення складних завдань. Наприклад, для продукції, що потребує спеціальних температурних умов, система BAS може відслідковувати температурні коливання за допомогою сенсорів і, у разі досягнення критичних значень, передавати сигнал в систему WMS, яка повідомить працівників про проблему.

IoT у логістиці представлений різноманітними технологіями, від сенсорів, датчиків, міток і роботів до засобів комунікації між ними. Зв'язок між пристроями та системами керування забезпечується за допомогою бездротових технологій, таких як Bluetooth, RFID, ZigBee, WiFi, а також мобільних мереж 3G і LTE, що інтегрують усі пристрої в єдину мережу.

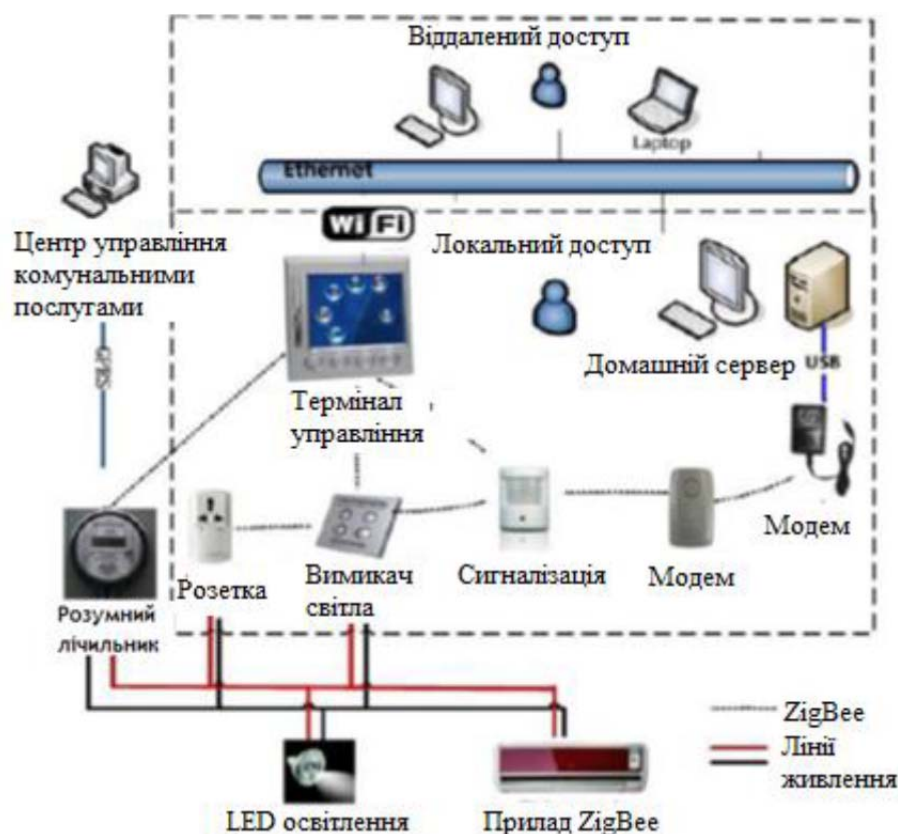


Рисунок 1 – Структурна схема роботи технології "розумний дім" стосовно складських споруд  
Джерело: розроблено авторами напідставі [4]

Складська логістика, де щодня мільйони об'єктів маркуються і транспортуються на різні відстані, ідеально підходить для впровадження Інтернету речей (IoT). На складах IoT-пристрої використовуються для збору інформації про матеріальні активи на всіх етапах ланцюга постачань, з подальшою обробкою та аналізом цих даних. Це дає змогу логістичним компаніям, а також торговим і виробничим підприємствам, які самостійно виконують деякі логістичні функції, застосовувати IT-інструменти для підвищення операційної ефективності, створюючи нові автоматизовані сервіси як для внутрішнього використання, так і для зовнішніх клієнтів.

Ефективність складських процесів, обіг складів, контроль за наповненням та залишками стають важливими інструментами у конкурентній боротьбі. Насправді контроль за складом та складськими комплексами, де одночасно знаходяться сотні та тисячі одиниць різноманітних товарів з різними умовами зберігання – це справжній

виклик. На сьогодні просто маркування товарів на складі вже недостатньо для його ідеальної роботи. Існує багато "прихованих" активів – від полиць до навантажувачів, які можна зробити ефективнішими та об'єднати в єдину систему за допомогою сучасних технологій.

Перша сфера застосування технологій IoT на складах – це "розумне" управління інвентарем (smart inventory management). Дані сенсорів та датчиків надходять у систему WMS, дозволяючи в реальному часі відстежувати, що зберігається на складі, у якій кількості, і виправляти помилки в зберіганні.

IoT-рішення також сприяють підвищенню ефективності складського обладнання – від навантажувачів до транспортерних стрічок. Вони можуть бути обладнані сенсорами для оптимізації їхньої пропускної здатності та швидкості роботи. Наприклад, компанія Swisslog пропонує рішення Smart LIFT, яке використовує сенсори на підйомниках та штрих-коди на полицях, а дані передаються до системи WMS за допомогою локальної системи GPS. Це дозволяє водіям навантажувачів отримувати завдання з актуальним місцезнаходженням товарів. Це рішення було впроваджено на складі Bobcat, де компанія змогла збільшити обробку палет на 30% на годину без помилок.

Інтернет речей також допомагає ретельніше контролювати роботу складських працівників і підвищувати їхню безпеку. За даними Асоціації промислового транспорту ІТА США, у країні використовується понад 855 тис. вилкових навантажувачів, і щороку трапляється понад 100 тис. нещасних випадків, пов'язаних із ними. Більшість таких інцидентів стосуються "пішоходів", тобто інших працівників, які перебувають поруч.

Друга сфера – контроль за цілісністю товарів та інших матеріальних активів. Це обширна область. Наприклад, система може контролювати умови зберігання товарів, яка потребує особливих умов. Крім того, за допомогою камер на складі та в зоні відвантаження можна виявляти пошкодження упаковки або товарів.

Третя сфера – підвищення якості обслуговування клієнтів. Датчики в зоні відвантаження можуть забезпечити додаткову перевірку, щоб гарантувати, що вантаж направляється потрібному клієнту, зменшуючи ризик помилок і пересортування. Для великих клієнтів можна організувати послуги з онлайн-моніторингу їхніх товарів, що сприятиме зростанню їхньої лояльності. Можливість відстежувати вантаж по всьому ланцюгу підвищує довіру клієнтів до логістичного оператора.

Використання сенсорів, мікропроцесорів та бездротових технологій на складах і транспорті вже стало нормою, а штрих-коди та RFID-мітки застосовуються протягом багатьох років. Логістичні компанії стали одними з піонерів промислового Інтернету речей, використовуючи широкий спектр обладнання — від ручних сканерів до сенсорів, що відслідковують рух техніки. Проте це реалізується лише початковий потенціал системи IoT від обсягу загального потенціалу, який можливий на сучасних складах і комплексах. (рис. 2).

Слід пам'ятати, що у центрі кожної складної технології завжди присутня більш проста основа. Для "розумного" складу такою основою є RFID-технологія (Radio Frequency IDentification). Радіочастотна ідентифікація, яка дозволяє отримувати дані з транспондерів (RFID-міток). З розвитком цієї технології з'явилися нові її можливості: RFID-мітки можуть передавати не тільки основну інформацію, але й значно більший обсяг додаткових даних. Для розумних складів це може бути інформація про термін придатності товару, виробника, колір, вагу, умови зберігання тощо.

Крім RFID, важливу роль відіграє система управління складом WMS (Warehouse Management System), яка автоматизує процеси управління складом. Основні її функції

включають управління трудовими ресурсами, складськими операціями (прийом, комплектація, відправка товару), складування, управління замовленнями, поповнення запасів, вибір оптимальних варіантів упаковки, автоматичне ведення документації та управління персоналом.



Рисунок 2 – Схема роботи технології "Розумний склад"

*Джерело: розроблено авторами на підставі [18]*

Інноваційний підхід до технологій "Розумного складу" передбачає наступні запропоновані технологічні рішення:

1. Автоматизований облік та документообіг. Це включає автоматизацію всіх складських операцій і документів, що значно підвищує ефективність процесів.

2. Інтеграція з обліковими системами та датчики для автоматизації. На складі використовуються радіотермінали, через які дані про надходження та замовлення надходять безпосередньо з облікових систем клієнта, що спрощує процеси та зменшує кількість помилок.

3. Системи бізнес-процесів. Бізнес-процеси прописуються за заздалегідь встановленими правилами. Ці правила налаштовуються один раз вручну, а далі система автоматично їх застосовує для оптимізації роботи. Крім того, система зберігає велику кількість даних, що відкриває нові можливості для аналітики.

4. Поєднання технології "Розумний склад" з бізнес-процесами. Це дає можливість покращити внутрішні процеси складу: система аналізує поточні бізнес-процеси, визначає "вузькі місця" та пропонує користувачам найкращі практики з різних галузей.

5. Підтримка нових технологій та систем в організації бізнес-процесів. До цих технологій і систем належать: "pick-by-light"; "pick-to-light"; "pick-by-voice"; "pick-by-vision"; біотелеметрія; відеологістика; віртуальна реальність.

6. Автоматизація процесів на прикладі складів Amazon і Knapp. Ці склади використовують дронів та роботів для виконання всіх завдань з максимальною точністю. Проте такі системи вимагають великих інвестицій та високої стабільності

економіки. Автоматизовані склади – це дороге рішення, яке можуть собі дозволити лише великі компанії.

7. Машинне навчання та нейромережі, які є технологіями штучного інтелекту в складських системах. Хоча повноцінного алгоритму для повної автоматизації бізнес-процесів ще немає, машинне навчання вже впроваджується в окремі модулі сучасних WMS. Очікується, що в майбутньому ці технології значно вдосконалять роботу складських систем.

Розумний склад (Smart warehouse) – це технічний продукт, де важливо поєднати інфраструктуру з технологіями для оптимізації процесів, таких як розвантаження, транспортування, комплектування полиць, обробка замовлень і відправлення. Чим швидше виконуються ці операції, тим ефективнішим є склад. При проектуванні Smart warehouse основна увага надається програмному забезпеченню (ПЗ), яке пов'язує у собі воедино не тільки ядро програми, що безпосередньо управляє складом, а й потенційні замовники та виробники. Про момент закінчення певного товару, згідно з історією попиту обов'язково повідомляються клієнти, які регулярно купують цей товар. Вони повідомляють адміністратора Smart warehouse про свої плани, а він автоматично формує заявку постачальникам.

Після цього ПЗ заздалегідь визначає майданчики для розміщення товару, враховуючи попит, умови зберігання та оптимальні маршрути доставки до пунктів відвантаження. Якщо товар потребує зберігання за низьких температур, його спрямовують до спеціалізованих холодильників.

Зазначимо, що попит на ті чи інші групи товарів найчастіше має певну логіку. При цьому до уваги беруться моменти зростання інтересу до товару і, відповідно, частіше замовляють, тим ближче до пунктів обробки товарів переміщуються стелажі із "запасами" – у так звану гарячу зону. Як тільки свята проходять, одразу товари переміщуються углиб складської зали у зв'язку з падінням запитів – уже у холодну зону.

Навіть якщо спеціальної техніки немає, і доставку до пунктів обробки виконують складські працівники, час на це скорочується значно. У простих випадках, коли стелажі стаціонарні, контейнери з найбільш популярним товаром для наступного дня автотранспортом переміщують за вказівкою спеціальної програми після завершення робочого дня.

Також система Smart warehouse повинна забезпечити місце для зберігання браку. Це дозволяє одночасно обробляти товари та прокладати найоптимальніші маршрути. В результаті заповнюваність полиць досягає 80-95%. Зазначимо, що на звичайних дилерських складах замовлення виконуються послідовно, а заповнюваність полиць із найзатребуванішими товарами не перевищує 50%. При цьому енергоефективність складу як мінімум удвічі вища, ніж у стандартних центрах.

Організувати роботу звичайного складу за принципом технології та системи Smart warehouse може невелика група досвідчених фахівців. Практика показує, що кожна гривня, вкладена у "розумну логістику", приносить складу 1,5 гривні додаткового прибутку і дозволяє економити близько 50% оборотних коштів, що обслуговуються у такому інноваційному центрі зберігання. Це суттєво підвищує конкурентоспроможність.

Перехід до концепції і системи "розумного" складу вимагає дослідження статистики переміщення товарів щонайменше протягом одного кварталу. Цього часу достатньо для формування загального уявлення про стан справ і специфіку роботи клієнта.

Крім того, знадобиться спеціальне обладнання, включаючи системи автоматизації обліку на основі штрих-кодів, мобільні промислові сканери, а також промисловий Wi-Fi

для обміну даними між терміналами збору даних і співробітниками складу.

Сьогодні "розумними" стають логістичні комплекси, де замовлення обробляються за алгоритмами інтелектуального ПЗ. У таких складах застосовують спеціалізовану робототехніку, термінали збору даних, RFID-мітки та штрих-коди. Управління товарними потоками здійснюється автоматично за пріоритетами адміністратора складу, на відміну від рутинної роботи традиційного комірника.

Оцінити вартість впровадження такого проєкту складно, оскільки кожен склад має свою специфіку. За американськими стандартами інвестиції повинні складати не менше 2...4% річної виручки логістичного центру, а прибуток може досягати 25% від замовлення.

Іншою інновацією Smart warehouse є їх автоматизація, що дозволяє значно знизити складські витрати, збільшити продуктивність, стабільність та якість роботи складу.

Модель складу в описаних бізнес-процесах дозволяє створити об'єктивну розрахункову систему роботи складу, де всі процеси і системи взаємопов'язані. При цьому оптимізацію можливо проводити, з погляду трудомісткості і часу виконання всіх бізнес-процесів, операцій, дій кожного співробітника, на основі системи нормування.

**Висновки:** 1. Аналіз ключових тенденцій у складській логістиці підтвердив їх значний вплив на підвищення ефективності логістичних процесів. Зокрема, автоматизація, цифровізація та омніканальність є основними напрямками розвитку, які дозволяють оптимізувати операційну діяльність складів. Інноваційні технології сприяють швидкому обміну інформацією та скороченню витрат на логістику, що позитивно впливає на продуктивність підприємств.

2. Визначено, що проблеми та виклики у складській логістиці включають потребу в значних інвестиціях для модернізації інфраструктури, забезпеченні кібербезпеки та адаптації до швидко мінливих умов ринку. Для підтримки конкурентоспроможності необхідно інтегрувати інноваційні рішення, які можуть задовольнити нові вимоги клієнтів, а також враховувати глобальні зміни та економічні коливання.

3. Розглянуто, що новітні технології мають позитивний вплив на управління складськими операціями, сприяючи оптимізації процесів зберігання, транспортування і обробки товарів. Визначено, що екологічні вимоги та сталий розвиток стають важливими чинниками в складській логістиці. Підприємства повинні впроваджувати екологічно чисті технології та практики, щоб відповідати сучасним стандартам сталого розвитку. Важливо забезпечити зниження енергоспоживання, мінімізацію відходів і використання екологічних матеріалів для досягнення сталого розвитку.

4. Розроблено метод оцінювання впливу технологій на ефективність логістичних операцій, що дозволяє визначати економічну доцільність впровадження конкретних інновацій. Запропонована типова структурна декомпозиція такої системи та її організаційна і функціональна структура.

5. Теоретично обґрунтовано запропоновані рекомендації для бізнесу які включають впровадження інтегрованих автоматизованих систем управління складами, інвестиції в новітні технології для підвищення ефективності логістичних операцій та реалізацію екологічно чистих технологій та тари. Це дозволить підвищити продуктивність складських господарств і зміцнити їхню конкурентоспроможність в умовах швидких змін ринку.

## Список літератури

1. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія / під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.

2. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія / В. В. Аулін та ін.; під заг. ред. В. В. Ауліна. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2020. 428с.
3. Біліченко В. В, Антонюк О. П. Підвищення ефективності експлуатації рухомого складу АТП шляхом прогнозування потреби в запасних частинах. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: V- а Міжн. наук.-практ. інтернет-конф., м. Вінниця, 13-14 квітня 2017 р.: тези доповіді. Вінниця, 2017. С. 5 - 7.
4. Ballou, R.H. (2007) The evolution and future of logistics and supply chain management. *European Business Review*. 19(4).P. 332-348.
5. Biniasz D. Logistyka dystrybucji u dostawcy przemysłowego: studium przypadku. *Logistyka*. 2015. № 3. P. 404-412.
6. Brix-Asala, C. Hahn R. Seuring S. Reverse logistics and informal valorisation at the Base of the Pyramid: A case study on sustainability synergies and trade-offs. *European Management Journal*. Vol. 34. № 4. 2016. P. 414-423.
7. Bujak A., Gubskaya N. Innovations and changes in the logistics tasks implementations. *Zeszyty Naukowe Wydziałowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*. 2012. P. 45-58.
8. Juan A. Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *Energies*. 2016. Vol. 9.
9. Rakovska M. The impact of strategy and logistics on performance: a methodological framework. *Research in logistics and production*. 2013. Vol. 3, № 3. P. 213-223.
10. Крикавський Є.В. Логістичне управління: Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. 684 с.
11. Литвишко Л. О. Управління формуванням та розподілом запасних частин для транспортних засобів: дис. канд. ек. наук: 08.00.04 / Литвишко Лілія Олександрівна Київ, 2013. 181 с.
12. Сумець О.М. Організаційне проектування логістичної системи підприємства. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. № 6(177). Ч.2. 2012. С. 76-81.
13. Тридід О. М., Логістика : монографія. Київ : Знання. 2008. 566 с.
14. Якименко Н. В. Застосування логістичного підходу в діяльності транспортної системи. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2014. № 45. С. 259-262.
15. Городко М.В. Передумови та закономірності використання логістичного менеджменту. *Економіка та держава*. 2017. № 8. С. 80-83.
16. Ballou, R. H. (2007). *Business logistics management*. Pearson Education.
17. Manufacturing and Logistics IT, 1463-1172 / Interactive Business Communications, Ltd., UK: Latimer House, February 2008. 68 p.
18. Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The handbook of logistics and distribution management*. Kogan Page Publishers.
19. Mentzer, J. T., Stank, T. P., & Esper, T. L. (2008). Supply chain management and its relationship to logistics, marketing, production, and operations management. *Journal of Business Logistics*, 29(1).P. 31-46.
20. Денисенко М. П. Організація та проектування логістичних систем: монографія. Київ: Центр учбової літератури. 2010. 336 с.
21. Григорак М.Ю. Інноваційна логістика: концепції, моделі, механізми. Київ: НАУ, 2015. С. 31-68.
22. Біліченко В. В., Цимбал С. В., Антонюк О. П. Особливості застосування методу ABC для забезпечення запасними частинами рухомого складу автотранспортного підприємства. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: XII-а Міжн. наук.-практ. конф., м. Вінниця, 21-23 жовтня 2019 р.: тези доповіді*. м. Вінниця, 2019. С. 16-21.
23. Аулін В.В., Солових А.Є., Дігтяр Б. Економіко-математичне моделювання процесів управління підприємством в умовах господарського ризику і невизначеності. *Наук. праці КДТУ. Екон. науки*. 2000. Вип.8. С.151-156.
24. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Дьяченко В.О. Теоретичний системно-спрямований підхід до визначення інтегрального показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4(35). С.232-247.
25. Андрушкевич З.М. Маркетинг-логістичне забезпечення діяльності машинобудівних підприємств: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: спец. 08.00.04 "Економіка та управління підприємствами". Хмельницький, 2011. 20 с.
26. Аулін В. В., Лисенко С. В., Гриньків А. В., Голуб Д. В., Головатий А. О. Логістика постачання транспортних і виробничих підприємств, фірм, компаній: Навчальний посібник під заг. ред. д.т.н.,

- проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2022. 325 с.
27. Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Оптимізація і управління ресурсами в транспортно-логістичній системі АПК. *Наукові нотатки*. 2018. №62. С.8-11.
28. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В. Методологічний підхід до визначення рівня якості функціонування транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. №1(7). 49с.
29. Устенко М. О., Івашкевич В. С. Перспективи розвитку транспортно-логістичних систем України. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2017. № 59. С. 84-90.
30. В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, О.П. Цьонь, В.З. Гудь, А.О. Головатий, С.Ю.Тищенко, А.А. Сергійчук, Формування логістичної інформаційної системи ефективного управління транспортними і виробничими підприємствами// *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40).

## References

1. Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychyykh system: monohrafiia / pid zah. red. d.t.n., prof. Aulina V.V. Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F., 2021. 503 p.[in Ukrainian].
2. Metodolohichni osnovy proektuvannia ta funktsionuvannia intelektualnykh transportnykh i vyrobnychyykh system : monohrafiia / V. V. Aulin ta in.; pid zah. red. V. V. Aulina. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F., 2020. 428.p.[in Ukrainian].
3. Bilichenko V. V, Antoniuk O. P. Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii rukhomoho skladu ATP shliakhom prohnouzuvannia potreby v zapasnykh chastynakh. Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu: V- a Mizhn. nauk.-prakt. internet-konf., m. Vinnytsia, 13-14 kvitnia 2017 r.: tezy dopovidi. Vinnytsia, 2017. P. 5-7[in Ukrainian].
4. Ballou, R.H. (2007) The evolution and future of logistics and supply chain management. *European Business Review*. 19(4).P. 332-348[in English].
5. Biniasz D. Logistyka dystrybucji u dostawcy przemyslowego: studium przypadku. *Logistyka*. 2015. № 3. P. 404-412 [in English].
6. Brix-Asala, C. Hahn R. Seuring S. Reverse logistics and informal valorisation at the Base of the Pyramid: A case study on sustainability synergies and trade-offs. *European Management Journal*. Vol. 34. № 4. 2016. P. 414-423 [in English].
7. Bujak A., Gubskaya N. Innovations and changes in the logistics tasks implementations. *Zeszyty Naukowe Wydziałowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*. 2012. P. 45-58 [in English].
8. Juan A. Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *Energies*. 2016. Vol. 9 [in English].
9. Rakovska M. The impact of strategy and logistics on performance: a methodological framework. *Research in logistics and production*. 2013. Vol. 3, № 3. P. 213-223 [in English].
10. Krykavskiy Ye.V. Lohistychne upravlinnia: Lviv: Vyd-vo Nats. un-tu "Lvivska politekhnik", 2005. 684.P.[inUkrainian].
11. Lytyvshko L. O. Upravlinnia formuvanniam ta rozpodilom zapasnykh chastyn dlia transportnykh zasobiv: dys. kand. ek. nauk: 08.00.04 / Lytyvshko Liliia Oleksandrivna – Kyiv, 2013. 181 p[inUkrainian].
12. Sumets O.M. Orhanizatsiine proektuvannia lohistychnoi systemy pidpriemstva. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. № 6(177). Ch.2. 2012. P. 76-81.
13. Trydid O. M., Lohistyka : monohrafiia. Kyiv : Znannia. 2008. 566 p[in Ukrainian].
14. Yakymenko N. V. Zastosuvannia lohistychnoho pidkrodu v diialnosti transportnoi systemy. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*. 2014. № 45. P. 259-262[in Ukrainian].
15. Horodko M.V. Peredumovy ta zakonornosti vykorystannia lohistychnoho menedzhmentu. *Ekonomika ta derzhava*. 2017. № 8. P. 80-83[in Ukrainian].
16. Ballou, R. H. (2007). *Business logistics management*. Pearson Education [in English].
17. *Manufacturing and Logistics IT, 1463-1172 / Interactive Business Communications, Ltd., UK: Latimer House, February 2008. 68 p. [in English].*
18. Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The handbook of logistics and distribution management*. Kogan Page Publishers [in English].
19. Mentzer, J. T., Stank, T. P., & Esper, T. L. (2008). Supply chain management and its relationship to logistics, marketing, production, and operations management. *Journal of Business Logistics*, 29(1). P. 31-46 [in English].
20. Denysenko M. P. Orhanizatsiia ta proektuvannia lohistychnykh system: monohrafiia. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury. 2010. 336 p.[in Ukrainian].

21. Hryhorak M.Iu. Innovatsiina lohistyka: kontseptsii, modeli, mekhanizmy. Kyiv: NAU, 2015. P. 31-68[inUkrainian].
22. Bilichenko V. V., Tsymbal S. V., Antoniuk O. P. Osoblyvosti zastosuvannya metodu AVS dlia zabezpechennia zapasnymi chastynamy rukhomoho skladu avtotransportnoho pidpriemstva. Suchasni tekhnologii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu: XII -a Mizhn. nauk.-prakt. konf., m. Vinnytsia, 21-23 zhovtnia 2019 r.: tezy dopovidi. m. Vinnytsia, 2019. P. 16-21[inUkrainian].
23. Aulin V.V., Solovykh A.Ie., Dihtiar B. Ekonomiko-matematychne modeliuвання protsesiv upravlinnia pidpriemstvom v umovakh hospodarskoho ryzyku i nevyznachenosti. Nauk. pratsi KDTU. Ekon. nauky. 2000. Vyp.8. P.151-156[inUkrainian].
24. Aulin V.V., Holub D.V., Zamurenko A.S., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., Diachenko V.O. Teoretychnyi systemno-spryamovanyi pidkhid do vyznachennia intehralnoho pokaznyka efektyvnosti realizatsii operatsii v transportnykh systemakh // Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2021. Vyp. 4(35). P.232-247[inUkrainian].
25. Andrushkevych Z.M. Marketynh-lohistychne zabezpechennia diialnosti mashynobudivnykh pidpriemstv: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. ekon. nauk: spets. 08.00.04 "Ekonomika ta upravlinnia pidpriemstvamy". Khmelnytskyi, 2011. 20 p[inUkrainian].
26. Aulin V. V., Lysenko S. V., Hrynkiv A. V., Holub D. V., Holovaty A. O. Lohistyka postachannia transportnykh i vyrobnychkh pidpriemstv, firm, kompanii: Navchalnyi posibnyk pid zah. red. d.t.n., prof. Aulina V.V. – Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F., 2022. 325 p[inUkrainian].
27. Aulin V.V., Velykodnyi D.O., Diachenko V.O. Optymizatsiia i upravlinnia resursamy v transportno-lohistychnii systemi APK. Naukovi notatky. 2018. №62. P.8-11[inUkrainian].
28. Aulin V.V., Holub D.V., Bilichenko V.V. Metodolohichni pidkhid do vyznachennia rivnia yakosti funktsionuvannya transportnykh system. Visnyk mashynobuduvannya ta transportu. 2018. №1(7). 49 p[inUkrainian].
29. Ustenko M. O., Ivashkevych V. S. Perspektyvy rozvytku transportno-lohistychnykh system Ukrainy. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti. 2017. № 59. P. 84-90[inUkrainian].
30. V.V. Aulin, O.L. Liashuk, A.V. Hrynkiv, O.P. Tson, V.Z. Hud, A.O. Holovaty, S.Iu. Tyshchenko, A.A. Serhiichuk, Formuvannya lohistychnoi informatsiinoi systemy efektyvnoho upravlinnia transportnymi i vyrobnychmy pidpriemstvamy// Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2024. Vyp. 9(40)[inUkrainian].

**Victor Aulin**, Prof., DSc., **Sergii Tyshchenko**, post-graduate, **Andriy Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD. tech. sci. Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

### **Innovative Solutions in Warehouse Logistics**

The article discusses current trends in warehouse logistics, such as automation, digitalization, omnichannel, environmental sustainability, and the growth of e-commerce. The main challenges of the industry include high automation costs, insufficient staff qualifications to work with innovative technologies, difficulties in adapting to global changes in supply chains, and the need to comply with environmental standards. The article analyzes the latest research on the use of intelligent systems, big data, artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) to optimize warehouse operations. The aim of the work is to develop innovative solutions to improve the efficiency of warehouse process management and the competitiveness of enterprises. Approaches are proposed to assess the impact of the latest technologies on warehouse logistics management and sustainable development. An analysis of key trends in warehouse logistics has confirmed their significant impact on improving the efficiency of logistics processes. In particular, automation, digitalization and omnichannel are the main areas of development that help optimize warehouse operations. Innovative technologies facilitate the rapid exchange of information and reduce logistics costs, which has a positive impact on the productivity of enterprises. Identified problems and challenges in warehousing logistics include the need for significant investments to modernize infrastructure, ensure cybersecurity, and adapt to rapidly changing market conditions. To maintain competitiveness, it is necessary to integrate innovative solutions that can meet new customer requirements, as well as take into account global changes and economic fluctuations. Thus, the study confirms the need for a comprehensive approach to the modernization of warehousing facilities that takes into account innovative, economic and environmental aspects.

**warehouse, logistics, innovation, technology, management, intelligent systems**

*Одержано (Received) 19.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

UDK 656

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.286-293](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.286-293)

Uliana Plekan<sup>1</sup>, Assoc. Prof., PhD econ. sci., Viktor Aulin<sup>1,2</sup>, Prof, DSc., Oleg Tson<sup>1</sup>, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Volodymyr Dzyura<sup>1</sup>, Prof, DSc., Anatolii Matviishyn<sup>1</sup>, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

<sup>1</sup>*Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Ternopil, Ukraine*

<sup>2</sup>*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

*e-mail: kaf\_am@ukr.net*

## Logistics costs of a transport enterprise: organizational aspects

The article analyzes scientific research concerning the organizational aspects of logistics costs in transportation enterprises. The functions of logistics cost analysis are examined, and the importance of improving the accounting of logistics costs is highlighted. Practical recommendations are substantiated and developed for organizing activities related to ensuring the effective organization of logistics costs. The use of a process-oriented system for organizing logistics costs is proposed, and a basic concept for a process-oriented logistics cost management system for transportation enterprises is formulated. The impact of logistics indicators on the overall efficiency of enterprise operations is investigated. The structure of logistics costs for a typical enterprise is presented.

**transport enterprise, logistics costs, organization of logistics costs, logistics activities, process approach.**

**Introduction.** During the transformational processes in the geopolitical and economic self-determination of Ukraine, it is risky for transportation enterprises to rely solely on competitive advantages driven by technology or traditional management methods. Current trends in economic development are leading to an increase in associated business expenses. Therefore, optimizing total costs remains one of the most pressing challenges for enterprise management. The issues of cost optimization can be addressed through the effective organization of planning, accounting, analysis, and control of logistics costs, which will enable the formation of comprehensive costs and more accurate financial forecasting of operational results.

The development of a general concept for the logistics cost accounting system for a transportation enterprise requires in-depth research, considering the scientific advancements of both domestic and foreign scholars.

**Analysis of recent research and publications.** Effective management of logistics systems is a key factor in the successful operation of modern enterprises. In the studies by O. O. Andrukhova and I. A. Yakimov [1], the importance of organizing logistics cost accounting to enhance economic efficiency is emphasized. The authors highlight that accurate accounting allows for the control and optimization of expenses related to logistics operations.

V. V. Aulin and co-authors [2] examine the theoretical and methodological foundations of logistics in transportation and production systems in their monograph. They focus on the integration of transportation and production processes, which contributes to improving logistics management efficiency. Further research by V. V. Aulin et al. [3] concentrates on the formation of a logistics information system necessary for effective management of transport and production enterprises. The authors underscore the significance of implementing modern information technologies to optimize logistics processes.

S. V. Mishina and O. Yu. Mishin [4] propose a hierarchical classification of logistics costs based on functional purpose. This approach allows for more precise identification of cost sources and determination of optimization pathways. Similarly, U. M. Plekan et al. [5] conduct an analysis of a company's logistics expenses, pointing out the necessity of constant monitoring to ensure market competitiveness.

O. A. Rusanovska [6], in her dissertation research, examines controlling logistics activities within enterprise management systems. The author notes that effective controlling enables timely detection of deviations in logistics processes and the adoption of corrective actions.

At the international level, J.-M. Kim et al. [7] explore the allocation of costs in refrigerated logistics warehouses. They propose a methodology for allocating shared logistics costs, which is relevant for companies dealing with products requiring special storage conditions.

A. Mesjasz-Lech [8] addresses the challenges of green logistics related to urban air pollution. The author emphasizes the need for implementing "green logistics" to reduce negative environmental impacts.

N. Rozhko and co-authors [9] analyze the use of network intralogistics and fulfillment for the functioning of transport and warehouse complexes. They note that integrating these concepts enhances the efficiency of logistics operations and meets customer needs.

In the work by U. Plekan et al. [10], organizational aspects of creating a logistics strategy for a motor transport enterprise are studied. The authors stress the importance of strategic planning to adapt to changes in the market environment.

The digitalization of transport companies is the subject of research by N. Rozhko et al. [11]. The authors point out current challenges and development prospects associated with the implementation of digital technologies in logistics.

S. M. Russo et al. [12] propose a multi-method approach to designing urban logistics hubs for cooperative use. This contributes to optimizing urban logistics flows and reducing transport burdens.

Finally, J. Žak et al. [13], in their work, present advanced concepts, methodologies, and technologies for transportation and logistics. They focus on innovative solutions that can be implemented to enhance the efficiency of logistics systems.

Thus, the analysis of literary sources indicates a growing attention among researchers to issues of optimizing logistics costs, implementing information technologies, and greening logistics processes. This underscores the need for further research in this field and the practical application of the obtained results. However, approaches to the organization of logistics costs for transportation enterprises remain insufficiently developed.

**The aim of the article.** The aim of the article is to define and substantiate a process-oriented approach to organizing logistics costs in a transportation enterprise for their identification, control, and optimization.

The tasks of the article are as follows:

1. To review the approaches of domestic scholars regarding methodologies for organizing logistics costs
2. To develop the concept of a process-oriented system for organizing logistics costs in a transportation enterprise
3. To investigate the impact of logistics indicators on the overall efficiency of the enterprise's operations.

**Results.** A crucial component of a modern, efficient management system for a transportation enterprise is its logistics system, which can operate autonomously and serves as a key link in the enterprise's overall management. The application of management standards

that account for logistics processes contributes to achieving competitive advantages for domestic enterprises. Specifically, an enterprise can gain competitive advantages by minimizing total logistics costs, making the category of "costs" fundamental within the logistics system of a transportation enterprise.

Summarizing the contributions of domestic researchers, logistics costs can be defined as the monetary expression of the aggregate material, labor, financial, and informational resources expended by the enterprise, which are related to supporting business processes and operations that involve the movement of material flows within the logistics system.

Proper identification and analysis of logistics costs are prerequisites for their successful optimization. Therefore, the organization of logistics costs in a transportation enterprise deserves particular attention. Most transportation enterprises use a functionally-oriented organizational model focused on the enterprise's functional units, where the responsibility centers are departments, workshops, and divisions. Regardless of the functions performed by a structural unit, responsibility is measured by the costs incurred. Logistics cost organization can also be structured by responsibility centers, meaning that the structural units involved in specific phases of the enterprise's logistics activities are accountable for costs.

Other criteria for assessing logistics costs can also be applied. The most common classifications of an enterprise's logistics costs include:

- by the place of origin,
- by cost carriers,
- by analytical cost accounts,
- by phases of the logistics process, etc.

Given the strategic objective of logistics activities – to maximize customer satisfaction in terms of product quality, delivery time, and location – managing individual phases of a company's logistics activities takes on special importance. It is advisable to focus on this aspect. The functionally-oriented organizational model does not fully meet market requirements, as employees in individual structural units are not always incentivized by the final result and are often not aligned with the enterprise's strategic goals.

Furthermore, the phases of logistics activities extend beyond individual structural units. In contrast, when using a process-oriented organizational model, the focus is on the phases of logistics activities rather than the structural unit. The phases of logistics activities are a constant factor in optimizing the enterprise's logistics operations, and their continuous improvement enables the achievement of logistics objectives – providing the client with a high-quality transportation service in the shortest time possible. For greater efficiency in organizing logistics costs at transportation enterprises, it is advisable to combine both the functionally-oriented and process-oriented systems to identify logistics costs at the level of structural units as well as by phases of logistics activities.

The main goal of organizing accounting and analytical support for logistics activities is to serve the interests of all stakeholders by promptly providing objective information about the status and dynamics of material, financial, and informational flows, among others. This goal can be achieved by structuring the accounting and analytical support in line with the processes occurring within the enterprise. The operation-based system of organizing logistics costs involves a process-oriented approach integrated with the enterprise's information system (Fig. 1).

Managing logistics activities in a transportation enterprise is complicated by its multifaceted nature. Effective management of logistics costs enables the enterprise to:

1. At the "pre-sale" stage – establish a foundation for future product sales, create a system for identifying and analyzing consumer demand, and more accurately determine the transportation services required by the market.

2. At the "during-sale" stage – fully and adequately meet customer needs and desires, reduce transportation time, create a positive image, and increase customer loyalty.

3. At the "post-sale" stage – ensure favorable conditions for further stable development and effective functioning of the enterprise's logistics system.

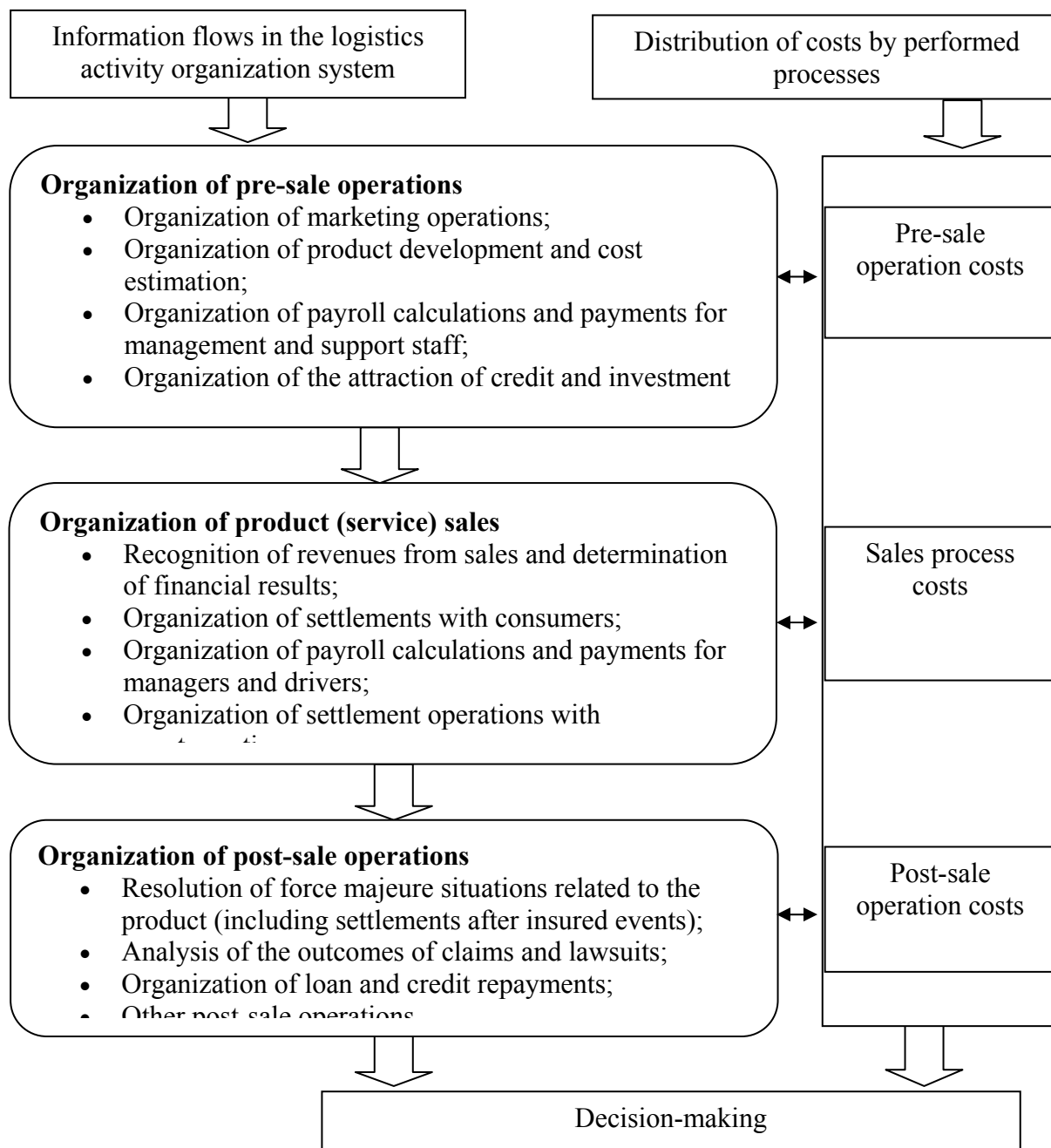


Figure 1- Concept of a process-oriented system for organizing logistics costs in a transportation enterprise

*Source: formed by authors*

Thus, the organization of an enterprise's logistics costs, integrated into the enterprise's information system, should provide managers with information at all stages of the transportation service process, as well as regarding pre-sale and post-sale operations. The

input operational and technical information includes primary documentation related to accounting operations, payroll calculation, revenue recognition from sales, and more.

The main tasks of a company's logistics department include:

- formation, development, and reorganization of the logistics system;
- development and implementation of the company's logistics strategy;
- internal and external logistics integration;
- management of material flows and related streams;
- logistics reengineering.

Addressing these tasks involves the execution of logistics operations, which in turn generate logistics costs that must be accurately recorded for further management decisions. Accurate and timely reflection of logistics operations requires prior organization of data recording related to this area. However, current methodologies face challenges in attributing logistics costs to specific business processes. It is proposed to modernize the accounting system to more effectively measure logistics costs through the use of an operation-based system, among others.

In the current accounting system at transportation enterprises, there is a contradiction where costs are grouped by elements or functions. Logistics costs are typically included in other corporate expenses and are not allocated separately, which prevents a proper assessment of their impact on the overall efficiency of the enterprise.

Let's review domestic scholars' approaches to the methodology of accounting for logistics costs. Some researchers argue that logistics costs should be accounted for separately to provide reliable data about them. It is advisable to isolate logistics costs separately, without requiring the restructuring of the existing information and regulatory framework of the enterprise. Scholars propose reflecting ongoing logistics costs by function, distinguishing between logistics costs in supply, production, and distribution. Another approach suggests expanding or detailing the existing method for accounting for logistics costs. Scholars suggest that to accumulate information on various costs associated with logistics activities, it is useful to reflect them in the following categories:

- logistics costs for supply;
- conditioned fixed logistics costs;
- conditioned variable logistics costs;
- logistics costs for administration.

Other researchers propose distinguishing the following groups of logistics costs:

- logistics costs for production;
- logistics costs for administration;
- logistics costs for distribution;
- logistics costs for transportation;
- logistics costs for order fulfillment.

Organization of logistics activities is a purposeful effort to create, structure, and improve logistics operations to generate relevant information flows and meet the needs of stakeholders.

The primary goal of closely integrating the management system with the logistics system is to enhance the analytical value of outgoing information flows and increase the efficiency of control at all stages of the enterprise's operations. The analysis of logistics costs helps improve the justification of management decisions aimed at adjusting business processes. It is important to note that logistics costs affect various aspects of the enterprise's activities, including personnel, customers, and the financial state of the transportation company (table 1).

Table 1 – Impact of logistics indicators on the overall efficiency of the enterprise

| Activity aspects    | Impact of logistics indicators                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Financial component | reduction in the ratio of logistics costs to product cost; acceleration of inventory turnover for raw materials, semi-finished products, and finished goods; reduction in freight costs for raw materials and delivery time; increase in reliability of raw material deliveries |
| Personnel           | reduction in logistics staff turnover; optimization of duties in the logistics department and increasing their involvement in enterprise operations                                                                                                                             |
| Customers           | improvement in the reliability of finished goods delivery; reduction in freight costs and delivery time for finished goods; improvement in pre-sale, during-sale, and post-sale service; increased customer satisfaction                                                        |

The tasks of organizing logistics activities can be summarized as follows: documenting logistics operations; timely, complete, accurate, and continuous recording of logistics operations; allocating logistics costs to determine the production and total cost of transportation services; processing data on logistics operations using appropriate procedures, methods, and techniques in line with the source information; compiling analytical reports and delivering them to stakeholders.

Typical list of logistics costs at an enterprise includes:

- drivers' wages;
- social security contributions from drivers' wages;
- payroll tax for drivers;
- depreciation of transportation and equipment;
- fuel costs for freight transportation;
- maintenance of warehouses for raw materials and semi-finished products;
- maintenance of assets required for storing raw materials, semi-finished products, and rolling stock;
- maintenance of warehouses for finished goods;
- loading and unloading;
- wages for workers handling internal freight movements;
- documentation processing;
- product labeling, coding, and packaging;
- pre-sale service;
- during-sale service;
- post-sale service.

This list is conditional and depends on the enterprise's specialization. Managerial accounting of logistics costs requires the adaptation of cost items to the specific operations of each enterprise.

The composition of logistics costs depends on factors such as state economic regulation, political processes in the country, social conditions, legal regulations, production characteristics of the enterprise, organizational structure, level of information support, and marketing policies. These factors are directly linked to the execution of logistics operations, which incur corresponding logistics costs.

**Conclusions:** 1. Crossing out logistics costs from the overall costs of a transportation enterprise and implementing an effective system for organizing them is an objective necessity for the successful operation of the company.

2. It is noted that in the overall structure of logistics costs for small transportation enterprises, the majority consists of labor costs, taxes, levies, other mandatory payments, depreciation charges, and material costs related to logistics processes. These cost items have the greatest impact on the formation of product costs and require the highest level of control.

3. The use of a process-oriented system for organizing logistics costs is proposed, focusing on the phases of logistics activities to ensure the effective recording of logistics costs.

## Список літератури

1. Андрухова О. О., Якімов І. А. Організація обліку логістичних витрат. *Наука і економіка*. 2010. № 4 (20). С. 70–73.
2. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Головатий А.О., Голуб Д.В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. 2021. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 503 с.
3. В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, О.П. Цьонь, В.З. Гудь, А.О. Головатий, С.Ю. Тищенко, А.А. Сергійчук. Формування логістичної інформаційної системи ефективного управління транспортними і виробничими підприємствами. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч.ІІ, С 204-218.
4. Мішина С. В., Мішин О. Ю. Ієрархічна класифікація логістичних витрат за функціональним призначенням. *Бізнес-Інформ*. 2011. № 9 (404). С.103–105.
5. Плекан, У. М.; Цьонь, О. П.; Гевко, Б. Р.; Антонюк, О. П. Аналіз логістичних витрат підприємства. *ВМТ* 2023, 17. С. 114-120.
6. Русановська О. А. Контролінг логістичної діяльності в системі управління підприємством : дис. канд. економ. наук : 08.00.04. 2016. Львів : НУ «Львівська політехніка». 267 с.
7. Kim, J.-M.; Cho, G.; Ko, C.-S.; Park, Y.-T. Allocation of logistics sharing cost in refrigerated logistics warehouse. *ICIC Express Lett. Part B Appl.* 2021, 12. P. 943–948.
8. Mesjasz-Lech, A., Urban air pollution challenge for green logistics. *Transportation Research Procedia*. 2016. № 16. P. 355-365.
9. Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko. The use of network intralogistic and fulfillment for functioning of transport and warehouse complexes. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. Col.7(38), Part II, P. 257-264.
10. Plekan U., Lyashuk O., Aulin V., Tson O., Matviishyn A. Logistics Strategy of the Motor Transport Enterprise. Organizational Aspects of Creation. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2022. Col.6(37), p II. P. 75-82.
11. Rozhko N, Plekan U., Tson O., Matviishyn A. Digitalization of truck companies: current challenge and development prospect. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2022. Col.6(37). P. 208-214.
12. Russo, S.M.; Voegl, J.; Hirsch, P. A Multi-method approach to design urban logistics hubs for cooperative use. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 69p.
13. Zak, J. Hadas Y. Rossi R. Advanced Concepts, Methodologies and Technologies for Transportation and Logistics. *Springer*. 2017. Vol. 572. 312 p.

## References

1. Andrukhova, O. O., & Yakimov, I. A. (2010). Organization of accounting for logistics costs. *Science and Economics*, 4(20). P. 70–73. [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., Hrynkov, A. V., Lysenko, S. V., Holovaty, A. O., & Holub, D. V. (2021). *Theoretical and methodological foundations of logistics in transport and production systems* (V. V. Aulin, Ed.). Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V. F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Lyashuk, O. L., Hrynkov, A. V., Tson, O. P., Hud, V. Z., Holovaty, A. O., Tishchenko, S. Yu., & Serhiychuk, A. A. (2024). Formation of a logistics information system for efficient management of transport and production enterprises. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40), Part II. P. 204–218. [in Ukrainian].

4. Mishina, S. V., & Mishin, O. Yu. (2011). Hierarchical classification of logistics costs by functional purpose. *Business Inform*, 9(404). P. 103–105. [in Ukrainian].
5. Plekan, U. M., Tsion, O. P., Hevko, B. R., & Antonyuk, O. P. (2023). Analysis of enterprise logistics costs. *VMT*, 17. P. 114–120. [in Ukrainian].
6. Rusanovska, O. A. (2016). *Controlling of logistics activities in the enterprise management system* (Doctoral dissertation). Lviv: NU "Lviv Polytechnic". [in Ukrainian].
7. Kim, J.-M., Cho, G., Ko, C.-S., & Park, Y.-T. (2021). Allocation of logistics sharing cost in refrigerated logistics warehouse. *ICIC Express Letters. Part B: Applications*, 12. P. 943–948.
8. Mesjasz-Lech, A. (2016). Urban air pollution challenge for green logistics. *Transportation Research Procedia*, 16. P. 355–365.
9. Rozhko, N., Tsion, O., Plekan, U., Matviishyn, A., & Gevko, B. (2023). The use of network intralogistics and fulfillment for the functioning of transport and warehouse complexes. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 7(38), Part II. P. 257–264.
10. Plekan, U., Lyashuk, O., Aulin, V., Tsion, O., & Matviishyn, A. (2022). Logistics strategy of the motor transport enterprise: Organizational aspects of creation. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 6(37), Part II. P. 75–82.
11. Rozhko, N., Plekan, U., Tsion, O., & Matviishyn, A. (2022). Digitalization of truck companies: Current challenges and development prospects. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 6(37). P. 208–214.
12. Russo, S. M., Voegl, J., & Hirsch, P. (2021). A multi-method approach to design urban logistics hubs for cooperative use. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 69p.
13. Žak, J., Hadas, Y., & Rossi, R. (2017). Advanced concepts, methodologies and technologies for transportation and logistics. *Springer*. 2017. Vol. 572. 312 p.

**У.М. Плекан**<sup>1</sup>, доц., канд. екон. наук, **В.В. Аулін**<sup>1,2</sup>, проф., д-р техн. наук, **О.П. Цьонь**<sup>1</sup>, доц., канд. техн. наук, **В.О. Дзюра**<sup>1</sup>, проф., д-р техн. наук, **А.Й. Матвійшин**<sup>1</sup>, доц., канд. техн. наук

<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

<sup>2</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

### **Логістичні витрати транспортного підприємства: організаційні аспекти**

У статті проведено аналіз наукових досліджень щодо організаційних аспектів логістичних витрат транспортного підприємства. Належні ідентифікація та аналіз логістичних витрат є передумовами їх успішної оптимізації, тому розглянуте питання є актуальним. Більшість великих транспортних підприємств використовують функціонально-зорієнтовану організаційну модель, зосереджену на функціональних підрозділах підприємства, а центрами відповідальності виступають підрозділи, цехи, відділи. Організація логістичних витрат теж може здійснюватися за центрами відповідальності, тобто структурними підрозділами, що задіяні в окремих фазах логістичної діяльності підприємства. Метою статті є визначення та обґрунтування процесного підходу до організації логістичних витрат транспортного підприємства для їх ідентифікації, контролю та оптимізації.

Розглянуто функції аналізу логістичних витрат, висвітлено важливість удосконалення обліку логістичних витрат. Розглянуті підходи вітчизняних учених до методики організації логістичних витрат на підприємствах. Обґрунтовано й розроблено практичні рекомендації щодо організації діяльності, пов'язаної з забезпеченням організації логістичних витрат.

Для правильного та вчасного відображення логістичних операцій обов'язковою умовою є попередня організація фіксації даних щодо даного об'єкта. Наявна методологія характеризується проблемами пошуку бази віднесення логістичних витрат до певного бізнес-процесу, тому варто модернізувати систему дану ділянку для ефективнішого виміру логістичних витрат шляхом застосування поопераційної системи з-поміж інших. Запропоновано використання процесно-орієнтованої системи організації логістичних витрат і сформовано базову концепцію процесно-орієнтованої системи організації логістичних витрат транспортного підприємства. Досліджено вплив логістичних показників на загальну ефективність роботи підприємства. Наведено структуру логістичних витрат типового підприємства.

**транспортне підприємство, логістичні витрати, організація логістичних витрат, логістична діяльність, процесний підхід**

Одержано (Received) 10.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 18.10.2024

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024

UDC 656.6

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.294-300](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.294-300)

Lyudmyla Tarandushka<sup>1</sup>, Prof., DSc., Olexandr Kravchenko<sup>2,3</sup>, Prof., DSc., Yan Tarandushka<sup>1,3</sup>, student

<sup>1</sup>*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine,*

<sup>2</sup>*Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine,*

<sup>3</sup>*University of Žilina, Žilina, Slovak Republic*

*e-mail: tarandushkal@ukr.net; oleksandr.kravchenko@fstroj.uniza.s; yan453620@gmail.com*

## Exploring opportunities to improve freight transportation

The possibilities of freight transportation organization improving for the formation of an effective management model of the transport and logistics complex of the country are studied. The directions of improvement of freight transportation by sea transport are determined, as the one that performs the largest transport work on the transportation of goods. It is determined that the use of artificial intelligence in sea freight transportation will make it possible to control the temperature regimes in containers for storing the quality of their cargo, improve the transportation process by accelerating the selection of participants in the transport process, choosing the optimal transportation route, taking into account the shortcomings of past transport processes, speed up the conclusion of contracts for the transportation of goods, identify risks, monitor the health of the crew and provide it on time medical care. At the same time, ways to reduce environmental pollution in the operation of maritime transport have been identified, namely: the use of equipment that purifies exhaust gases on ships, the use of Panamax-type vessels using fuel that has a low content of sulfur and other harmful substances. Also, the development of the Arctic Northern Sea Route will make it possible to speed up cargo transportation from China to Northern Europe.

**transport and logistics complex, multimodal transportation, sea transport, cargo**

**Statement of the problem.** International freight transportation is the engine of any country's economy. As a rule, such transportation is multimodal. Freight traffic from China to Europe has increased 100 times over the past 10 years. To perform such transportation, sea transport is most often used. Today, maritime logistics is an integral part of the world market. It contributes to the reliable transportation of large-tonnage cargo over long distances to many countries. The main trend of the world transport market is the active introduction of information, telecommunication and computer technologies. Almost all modes of transport have felt the impact of digitalization and intellectualization. The global market of transport services is formed by fundamentally new management systems integrated into a single logistics information space. Therefore, the study of methods for improving the logistics of freight transportation is a topical topic of today.

**Analysis of the latest research and publications.** Logistics is constantly evolving. Every day, we see the rapid development of artificial intelligence, which is increasingly being implemented in the more complex infrastructures of our society. Its ability to quickly learn and develop encompassing large amounts of information shows a high potential for development in systems of legal structures [1]. The digitalization procedure is new for the transport market of Ukraine, therefore it requires the involvement of theoretical knowledge and practical experience of logistics services, transport, marketing, regional logistics, as well as regulatory, informational, financial and personnel support [2; 3]. The study of the development of container transportation infrastructure, logistics centers, seaports was carried out by G.E. Belyaeva, O.G. Pustovit [4], on the use of artificial intelligence in freight transportation systems - M. Maryenko, V. Kovalenko [5], M. Krenn [6].

**Statement of the task.** The purpose of this study is to identify directions for improving the organization of freight transportation for the formation of a new, more effective model of management of the transport and logistics complex of the country.

**Statement of the main material.** Identification of promising areas of transport management and logistics complex in the context of the global use of information support, which involves robotization, modeling and optimization of traffic flows, the use of big data, cyber systems and cybersecurity. This will make it possible to choose effective tools for the formation of the transport and logistics complex.

The use of artificial intelligence in freight logistics will be able to significantly improve the quality, speed, and productivity of deliveries around the world in the near future.

Today, there are cargo ships that use artificial intelligence equipped with special thermal sensors, thanks to which artificial intelligence can regulate the temperature in cargo containers. This idea was able to be implemented by CMA CGM, a company engaged in logistics deliveries in maritime logistics. In their real-time container cargo surveillance system, they use an AI-based "LoT" system. The "LoT" system (Fig. 1) is like a virtual connection between electronic devices. A network of LoT devices consists of smart devices that have access to the internet. To work, they use built-in systems: processors, sensors, equipment for collecting, sending and processing data received from their environment. Through an internet connection or other peripheral device connected to the network, data is exchanged between LoT devices. Further, all information is sent to the cloud server for analysis and processing. In some cases, devices communicate with other LoT devices and act based on information received from each other and with a combination of artificial intelligence. This is very important for vessels engaged in the transportation of food products, because the program can monitor the temperature of food products and at the right time raise or decrease it to further preserve the quality of products and thus not reduce their value in the sales market.

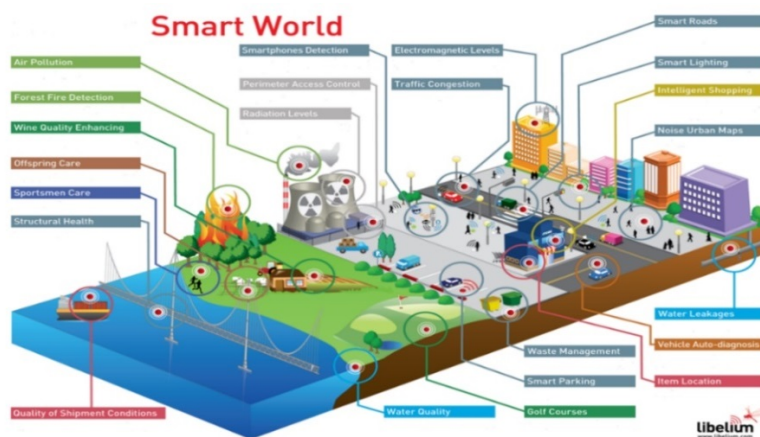


Figure 1 – Smart City Transport Networks in the LoT System

Source:[7]

An important condition for ensuring the delivery of international goods is the perfect organization of multimodal transportation. Ensuring the integrity of the transportation process is achieved through the implementation of an effective management system. Artificial intelligence accelerates the selection of participants in the transport process and transshipment of goods; facilitates the process of concluding transportation contracts; optimally provides solutions for the planning and reservation of vehicles and routes; continuously monitors the execution of transportation; clarifies economic indicators regarding the choice of transport schemes and the use of modes of transport; contributes to a comprehensive risk assessment.

Artificial intelligence can quickly process information and find out the weather forecast, view current schedules of sales and demand for products in different territories, it is able to prescribe more optimal delivery schedules that will ensure less damage during the transportation of goods. Also able to quickly find new delivery strategies by analyzing the history of past freight transportation. With the help of artificial intelligence, a system for monitoring the health of the crew was implemented, which helped to monitor the state of its health, provide medical assistance if necessary, and timely identify mental health problems, which reduced the frequency of crew member changes, improved the quality of their health, and increased the safety of maritime transportation [8].

In 2020, in cooperation with the Port of Rotterdam and Konecranes, a company specializing in the production of cranes and automated systems for ports, Konecranes Gottwald Model 6 artificial intelligence cranes were developed. As a result, these cranes are capable of handling 125 tons of general and heavy project cargo, as well as containers. One difference is that the new cranes use an external 690V power supply, which will reduce operating costs while reducing noise and exhaust emissions for the sake of preserving the environment. By using this method of unloading and loading ships, the number of accidents was reduced, which is not uncommon in ports. The creation of such cranes sets new standards in the logistics service sector, which we should strive for [9].

Simultaneously with the development of transport and logistics complexes, society should take care of reducing pollution during the operation of transport.

Transportation of goods by water transport is one of the most efficient and economical types of transportation. But this method of transportation is harmful to nature. Therefore, since 2020, the Chamber of Shipping association has been working to minimize sulfur emissions. It is planned to reduce the level of sulfur emissions from the currently permissible 3,5% to 0,5%. This is part of an international program aimed at reducing emissions from any type of ship, any type of pollution, in order to establish generally accepted standards that would flexibly respond to modern conditions of maritime transportation [10]. The parties involved in the adoption of these standards should coordinate their efforts in order to take into account all the needs of the participants in the process and reduce the permissible standard indicators of pollutants to a single system that will contribute to the preservation of the environment. For this purpose, equipment will be installed to purify the atmosphere from harmful gases, as well as equipment that prevents fuel emissions. This includes the use of equipment known as a "scrubber" - a device that purifies exhaust gases on ships (Fig. 2). But there is also a drawback that cannot be ignored, namely: scrubber waste must also be disposed of with care.

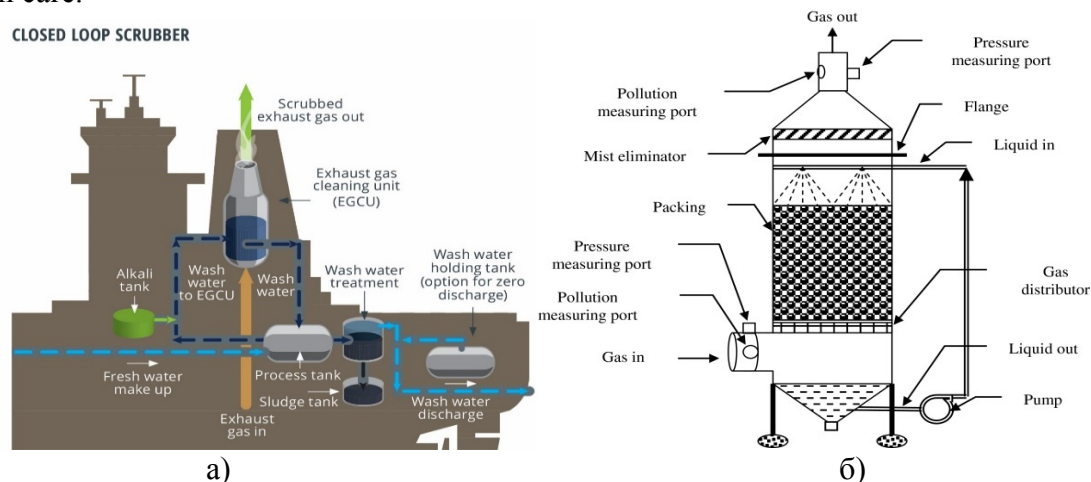


Figure 2 – The use of scrubber on a ship a) and the principle of their operation b)

Source:[11], [12]

The connection of the composition of sea vessels for cargo transportation to this system will be carried out in strict accordance with international requirements: a limited number of a certain type of vessels will be involved, namely, the Panamax type (Fig. 3).

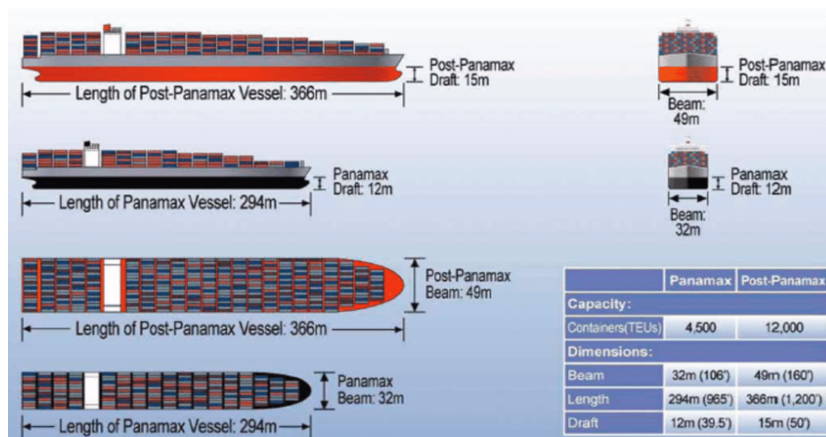


Figure 3 - Characteristics of Panamax type vessels.

Source: [13]

The fuel to be used on these vessels must be low in sulphur and other harmful substances. These measures are costly, but they will ensure that the environment is preserved. Old-type vessels will most likely not be able to function, since the use of new-type fuel on such vessels is impossible without the introduction of expensive modifications.

Also, for the effective functioning of transport logistics, it is necessary to attract new routes. Namely, for sea transportation, the Arctic Northern Sea Route is being explored. In 2024, Chinese general cargo ships have found a new way to circumvent the problems in the Red Sea associated with attacks on ships by the Houthis, namely the possibility of using the route through the Arctic Northern Sea Route. New Shipping vessels used the new route through the Arctic Northern Sea Route, while using icebreakers in the summer months. But scientists note that climate change and melting ice sheets will soon make it possible to use this route all year round. This route from China to Northern Europe via the Arctic Northern Sea Route is shorter than the Northwest Passage, which connects the Atlantic Passage with the Pacific Ocean (Fig. 4). A shorter distance will give shipping lines the opportunity to compete with faster modes of transport. It is clear that reducing delivery times will lead to lower fuel costs, lower emissions and lower pollution that harm the environment. However, parts of the Northeast Passage and most Arctic routes have not yet developed infrastructure, limited opportunities for search and rescue operations.

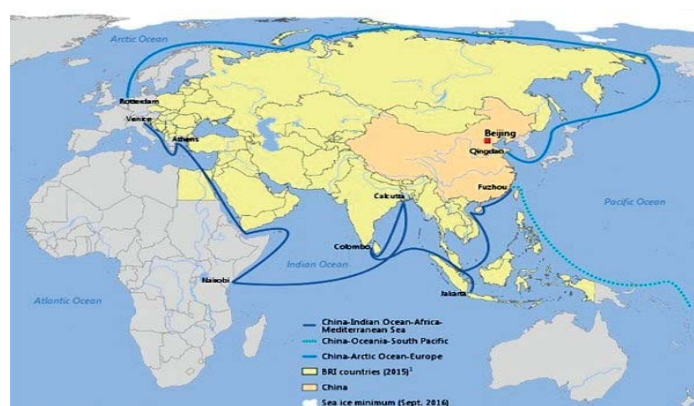


Figure 4 - The Arctic Northern Sea Route and the Northwest Passage connecting China to Northern Europe

Source: [14]

Active use of this route can facilitate cooperation between Europe and Asian countries. There is an option that most logistics companies will prefer the Arctic Northern Sea Route, due to its shorter route, which will facilitate the transportation of perishable products and urgent deliveries of goods. This route will be able to strengthen economic relations between Europe and Asian countries.

**Conclusions.** The possibilities of improving the freight transportation logistics for the formation of an effective model of management of the transport and logistics complex of the country are studied. The directions of freight transportation improvement by sea transport are determined, as the one that performs the largest transport work on the transportation of goods. Possible improvements are the application of artificial intelligence, the preservation of the environment and the development of new routes. This will improve the quality of cargo transportation, speed up the process of organizing and executing cargo transportation, as well as reduce the negative impact on the environment.

## List of references

1. Гуренко А. В., Зубов С. В. Впровадження інтелектуальних логістичних технологій в інфраструктурний комплекс морського транспорту. *Економічний вісник Донбасу*. 2020. № 3(61). С. 146-153, doi: 10.12958/1817-3772-2020-3(61)-146-153.
2. Сайт «Міністерство розвитку громад та територій України URL: <https://mtu.gov.ua/>. 26.09.2024
3. Никифорок О.І. Розвиток транспорту з метою відновлення і зростання української економіки: наукова доповідь. К.: НАН України, 2018. 200 с.
4. Беляєва Г.Є., Пустовіт О.Г. Аналіз сутності та умов формування підприємницького потенціалу підприємств морської галузі. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2018. No 1(62). С. 106-116.
5. Мар'єнко М., Коваленко В. Штучний інтелект та відкрита наука в освіті. *Фізико-математична освіта*. 2023. Том 38. No 1. С. 48-53. DOI: 10.31110/2413-1571-2023-038-1-007.
6. Krenn M., Pollice R., Guo S., Aldeghi M., Cervera-Lierta A., Friederich P., Gomes G., Hase F., Jinich A., Nigam A., Yao Z and Aspuru-Guzik A. On scientific understanding with artificial intelligence. *Nature Reviews Physics*. 2022. 4. P. 761–769.
7. Сайт «Libelium & SmartDataSystem present solar panel monitoring kits for photovoltaic plants with LoT. Retrieved» URL: <https://www.thsmartcityjournal.com/en/companies/libelium-and-smartdatasystem-present-solar-panel-monitoring-kits-that-control-photovoltaic-plants-performance-with-iot-technology>. 27.09.2024.
8. Стовба Т.А. Фронезіс використання штучного інтелекту у морській галузі. *Наукові перспективи*. 2023. № 7(37). С. 387-398. doi: 10.52058/2708-7530-2023-7(37)-387-398.
9. Сайт «Konecranes». Konecranes wins order in Rotterdam for mobile harbor crane Powered by Ecolifting. URL: <https://www.konecranes.com/press-releases/konecranes-wins-order-in-rotterdam-for-mobile-harbor-crane-powered-by-ecolifting>. 26.09.2024.
10. Сайт «АПК ІНФОРМ» Морська логістика: до нових викликів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1500695>. 28.09.2024.
11. Сайт «Nickel Institute». Onboard with marine scrubbers - resilient solutions for lower emissions. URL: <https://nickelinstitute.org/en/blog/2020%E5%B9%B4/march/onboard-with-marine-scrubbers>. 28.09.2024.
12. Jafari M., GhasemiR, MehrabiY., YazdanbakhshA., Hajibabaei M. Influence of liquid and gas flow rates on sulfuric acid mist removal from air by packed bed tower. *Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering*. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Counter-current-single-stage-packed-tower-scrubber\\_fig1\\_235390349](https://www.researchgate.net/figure/Counter-current-single-stage-packed-tower-scrubber_fig1_235390349). 28.09.2024.
13. Morrison B. Race-to-the-Top. *East and Gulf Coast Ports Prepare for a Post-Panamax World*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/305331669\\_Race-to-the-Top\\_East\\_and\\_Gulf\\_Coast\\_Ports\\_Prepare\\_for\\_a\\_Post-Panamax\\_World](https://www.researchgate.net/publication/305331669_Race-to-the-Top_East_and_Gulf_Coast_Ports_Prepare_for_a_Post-Panamax_World). 28.09.2024.
14. Сайт «Українська асоціація китаєзнавців». Арктичний курс Китаю: науковий та практичний аспект. URL: <https://sinologist.com.ua/koshovyj-s-arktychnyj-kurs-kytayu-naukovyj-ta-praktychnyj-aspekt>. 28.09.2024.

## References

1. Gurenko A.V., & Zubov S.V. (2020). Implementation of intelligent logistics technologies in the infrastructure complex of maritime transport. *Economic Bulletin of Donbas* No 3(61). P. 146-153 [in Ukrainian].
2. Information on water transport of Ukraine. Ministry of Infrastructure of Ukraine. Retrieved from: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-vodniy-transport-ukraini.html> [in Ukrainian].
3. Nykyforuk O.I. (2018). Development of transport with the aim of restoration and growth of the Ukrainian economy: scientific report. National Academy of Sciences of Ukraine, State Institution "Institute of Econ. and predicted. National Academy of Sciences of Ukraine". Kyiv, 200 p. [in Ukrainian].
4. Belyaeva G.E., & Pustovit O.G. (2018) Analysis of the essence and conditions for the formation of the entrepreneurial potential of enterprises in the maritime industry. *Development of methods of management and management in transport*. No 1(62). P. 106-116 [in Ukrainian].
5. Maryenko M., & Kovalenko V. (2023) Artificial Intelligence and Open Science in Education. *Physics and Mathematics Education*, Volume 38. No 1. P. 48-53. [in Ukrainian].
6. Krenn M., Pollice R., Guo S., Aldeghi M., Cervera-Lierta A., Friederich, P., Gomes G., Hase F., Jinich A., Nigam A. K., Yao Z and Aspuru-Guzik A. (2022) On scientific understanding with artificial intelligence. *Nature Reviews Physics*, 4. P. 761–769 [in English].
7. Libelium & SmartDataSystem present solar panel monitoring kits for photovoltaic plants with LoT. Retrieved from: <https://www.thesmartcityjournal.com/en/companies/libelium-and-smartdatasystem-present-solar-panel-monitoring-kits-that-control-photovoltaic-plants-performance-with-iot-technology> [in English].
8. Stovba T.A. (2023) Phronesis of the use of artificial intelligence in the maritime industry. *Scientific Perspectives* No 7(37). P. 387-398 [in Ukrainian].
9. Konecranes wins order in Rotterdam for mobile harbor crane Powered by Ecolifting. Retrieved from: <https://www.konecranes.com/press-releases/konecranes-wins-order-in-rotterdam-for-mobile-harbor-crane-powered-by-ecolifting> [in English].
10. Maritime logistics: to new challenges (2019) <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1500695> [in Ukrainian].
11. Onboard with marine scrubbers - resilient solutions for lower emissions (2020) Retrieved from: <https://nickelinstitute.org/en/blog/2020%E5%B9%B4/march/onboard-with-marine-scrubbers> [in English].
12. Jafari M., Ghasemi R., Mehrabi Y., Yazdanbakhsh A., & Hajibabaei M. (2012) Influence of liquid and gas flow rates on sulfuric acid mist removal from air by packed bed tower Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, Retrieved from: [https://www.researchgate.net/figure/Counter-current-single-stage-packed-tower-scrubber\\_fig1\\_235390349](https://www.researchgate.net/figure/Counter-current-single-stage-packed-tower-scrubber_fig1_235390349) [in English].
13. Morrison B. Race-to-the-Top: East and Gulf Coast Ports Prepare for a Post-Panamax World (2012) Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/305331669\\_Race-to-the-Top\\_East\\_and\\_Gulf\\_Coast\\_Ports\\_Prepare\\_for\\_a\\_Post-Panamax\\_World](https://www.researchgate.net/publication/305331669_Race-to-the-Top_East_and_Gulf_Coast_Ports_Prepare_for_a_Post-Panamax_World)
14. China's Arctic Course: Scientific and Practical Aspects (2017) Retrieved from: <https://sinologist.com.ua/koshovyj-s-arktychnyj-kurs-kytayu-naukovyj-ta-praktychnyj-aspekt>.

**Л.А. Тарандушка**<sup>1</sup> проф., д-р. техн. наук, **О.П. Кравченко**<sup>2,3</sup> проф., д-р. техн. наук, **Я.І. Тарандушка**<sup>1,3</sup>, студ.

<sup>1</sup>Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна,

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

<sup>3</sup>Жилінський університет, м. Жиліна, Словаччина

## Дослідження можливостей вдосконалення вантажних перевезень

Досліджено можливості вдосконалення організації вантажних перевезень для формування ефективної моделі управління транспортно-логістичним комплексом країни. Визначено напрями вдосконалення вантажних перевезень морським транспортом, як тим, що виконує найбільшу транспортну роботу з перевезення вантажів.

Визначено, що застосування штучного інтелекту в морських вантажних перевезеннях дасть змогу контролювати температурні режими в контейнерах для зберігання якості їх вантажу, вдосконалювати процес транспортування за рахунок прискорення вибору учасників транспортного процесу, вибору оптимального маршруту перевезення, враховуючи недоліки минулих транспортних процесів, пришвидшити заключення договорів на перевезення вантажів, визначати ризики, стежити за станом здоров'я екіпажу та надавати вчасно медичну допомогу.

Одночасно визначено способи зменшення забруднення навколишнього середовища при

експлуатації морського транспорту, а саме: використання обладнання, що очищає відпрацьовані гази на судах, застосування суден типу Рапатах, що використовує пальне, яке має низький вміст сірки та інших шкідливих речовин. Також освоєння Арктичного Північного морського шляху дасть можливість пришвидшити вантажні перевезення з Китаю до Північної Європи.

**транспортно-логістичний комплекс, мультимодальні перевезення, морський транспорт, вантажі**

*Одержано (Received) 03.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 17.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

**УДК 656.1, 711.5**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.300-305](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.300-305)

**В. О. Дзюра**, проф., д-р техн наук, **Ю.Я. Вовк**, доц., канд. техн. наук,

**М. В. Бабій**, доц., канд. техн. наук, **А. Й. Матвійшин**, доц., канд. техн. наук,

**У. М. Плекан**, доц., канд. екон. наук

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна*

*e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com*

## Особливості регулювання руху транспортних засобів на специфічних ділянках вулично-дорожньої мережі міст з інтенсивним транспортним потоком

Проаналізовано та виявлено потенційно небезпечні ділянки вулично-дорожньої мережі міста Калгарі (Канада). Встановлено, що окремі ділянки вулично-дорожньої мережі формують перехресні транспортні потоки, які створюють конфліктні точки злиття, та перетинання. Невелика відстань між елементами розв'язок залишає водіям недостатньо часу на здійснення маневру, що підвищує ризики утворення дорожньо-транспортних пригод. Розроблено рекомендації щодо регулювання дорожнього руху на вулично-дорожній мережі міст із високою інтенсивністю руху та швидкістю транспортного потоку. Запропоноване вирішення проблеми примикаючих транспортних потоків, що змінюють смуги руху на короткій ділянці вулично-дорожньої мережі.

**вулично-дорожня мережа, організація дорожнього руху, дорожньо транспортна пригода, смуги руху, інтенсивність транспортного потоку.**

**Постановка проблеми.** При інтенсивному розвитку великих міст будівництво транспортних розв'язок здійснюється поступово, вирішуючи транспортні проблеми та розвантажуючи вулично-дорожню мережу окремого мікрорайону, а не цілого міста в цілому. Таке будівництво зазвичай здійснюється в межах існуючої забудови міста. Формально транспортні розв'язки можуть вирішувати проблему перенаправлення транспортних потоків та відповідати усім встановленим нормативним показникам. Однак при цьому вони можуть створювати нові транспортні проблеми пов'язані з утворенням нових конфліктних точок транспортних потоків що в поєднанні з обмеженим часом на прийняття рішення та здійснення маневру водіями транспортних засобів призводить до підвищення ймовірності утворення дорожньо-транспортних пригод.

**Аналіз останніх досліджень публікацій.** Особливо ця проблема загострюється із невідпинним зростанням кількості індивідуальних транспортних засобів. Останні дослідження в цій сфері підкреслюють важливість зазначеної проблематики. У роботі

[1] обговорюються питання розвитку транспортної інфраструктури в умовах зростання популярності нових індивідуальних засобів пересування, таких як електросамокати, електровелосипеди, гіроскутери та інші. Ці транспортні засоби є екологічно безпечними і можуть стати альтернативою автомобілям з двигунами внутрішнього згоряння, особливо в теплі місяці. Для ефективного використання міської транспортної мережі пропонується розробка стратегій для розвитку інфраструктури, яка підтримуватиме різні види індивідуального транспорту.

Так, у роботі [2] досліджено державну політику та законодавчу базу України та ЄС щодо екологічних вимог у транспортній галузі. Проаналізовано ключові проблеми екологічної безпеки, пов'язані з автомобільним транспортом, і запропоновано рекомендації для вдосконалення законодавчих норм у цій сфері.

Аналіз транспортних моделей у роботі [3] охоплює низку рішень, спрямованих на планування довгострокового розвитку транспортної системи, оптимізацію руху, поєднання громадського та приватного транспорту, а також підвищення безпеки та екологічної ефективності.

Одним з шляхів зменшення транспортного навантаження на вулично-дорожньої мережі (ВДМ) є використання громадського транспорту. У роботі [4] проведено детальний аналіз функціонування міського громадського транспорту, зокрема маршрутних транспортних засобів. Розроблено методику дослідження динаміки руху колісного транспорту категорії M2, яка дозволяє оцінити вплив різноманітних перешкод на швидкість та ефективність пасажирських перевезень. Методика враховує такі фактори, як дорожня інфраструктура, щільність руху та наявність світлофорних регулювань. Важливим аспектом дослідження є результати експериментальних спостережень за рухом автомобілів на міських маршрутах у Житомирі, що дозволяє зробити висновки щодо оптимізації транспортної системи міста та підвищення комфорту для пасажирів.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз стану вулично-дорожньої мережі (ВДМ) м. Калгарі (Канада) та пошук рішень запобігання утворення перехресних транспортних потоків на ділянках ВДМ міст з інтенсивним рухом.

**Виклад основного матеріалу.** Із зростанням щільності транспортного потоку підвищуються вимоги до уваги водіїв, що призводить до збільшення стресу та підвищує ризик аварій. Затори, спричинені великою кількістю автомобілів у години пік і недостатньою пропускну здатністю доріг, прямо впливають на кількість дорожньо транспортні пригоди (ДТП). При цьому, за низької швидкості руху наслідки ДТП можуть бути менш серйозними.

Дослідження проведено на основі власних спостережень авторів на непоодинокі ділянках ВДМ міста Калгарі (Канада).

Існують ділянки вулично-дорожньої мережі, на яких до основної магістралі примикає додаткова дорога чи смуга руху для злиття транспортних потоків. Через невелику відстань відгалужується смуга руху для виведення транспортного потоку із основної магістралі. Зважаючи на доволі високі швидкості руху транспортного потоку, а також його інтенсивність водіям може бути недостатньо часу для здійснення маневру зміни смуги руху. Це типова ситуація для ділянок між двома кільцевими розв'язками м. Калгарі. Так на ділянці дороги Deerfoot Trail SE до основного транспортного потоку, що рухається по чотири смуговій транспортній магістралі примикає односмугова дорога з Barlow Trail SE, а через 500 м. розташований кільцевий з'їзд на 24 Street SE (рис. 1).

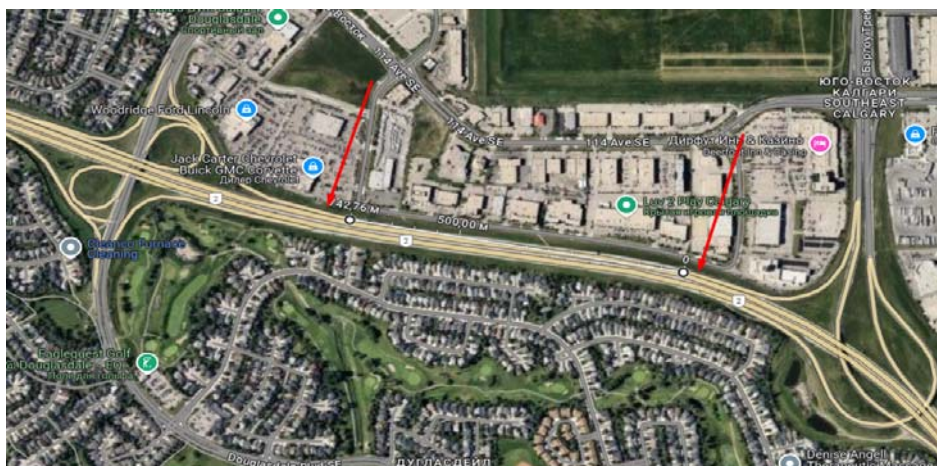


Рисунок 1 – Ділянка дороги Deerfoot Trail SE між кільцевими з'їздами Barlow Trail SE та 24 Street SE

*Джерело: розроблено авторами з використанням сервісу Google Maps*

На цій ділянці руху при швидкості транспортного потоку 100 км/год у водія, що рухається з примикаючої смуги руху буде всього 18 секунд на здійснення маневру зміни смуги руху з крайньої правої в крайню ліву, змінивши три смуги руху. При цьому деякі водії, що рухаються по основній дорозі Deerfoot Trail SE будуть намагатись зайняти крайню праву смугу для виїзду на кільцевий з'їзд розташований попереду через 500 м. При інтенсивному транспортному потоці це зробити доволі складно та призводить до різких дій водіїв, що може викликати дорожньо-транспортну пригоду.

Аналогічна ситуація у цьому ж місті на Deerfoot Trail на ділянці між 212 Ave SE та Seton Blvd SE становить всього 474 м, що при швидкості транспортного потоку даватиме водію 17 секунд на прийняття рішення та виконання маневру. Транспортна проблема полягає саме у перехресних транспортних потоках, що намагаються змінити смугу руху на короткій ділянці вулично-дорожньої мережі при великій швидкості та інтенсивності транспортного потоку (рис. 2), створюючи таким чином конфліктні точки. Інші проблемні ділянки мають ще меншу відстань між елементами вулично-дорожньої мережі, що поєднує транспортні потоки, що перетинаються.

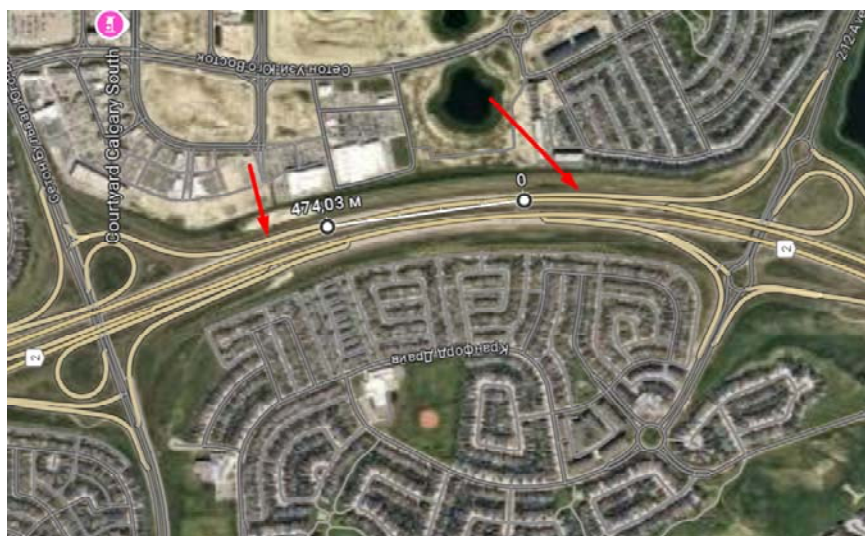


Рисунок 2 – Розміщення кільцевих розв'язок та з'їздів на ділянці Deerfoot Trail на ділянці між 212 Ave SE та Seton Blvd SE

*Джерело: розроблено авторами з використанням сервісу Google Maps*

Така ситуація насправді є типовою для багатьох ділянок вулично-дорожньої мережі великих міст і тому вимагає типового рішення для уникнення потенційно небезпечних ситуацій.

Запропоновано декілька варіантів вирішення описаної транспортної проблеми та пошуку оптимального рішення для регулювання дорожнього руху транспортних засобів на коротких ділянках вулично-дорожньої мережі міст з обмеженим часом на прийняття рішення щодо здійснення маневру зміни смуги руху.

Варіантів вирішення описаної транспортної проблеми є декілька.

Перший варіант полягає у побудові з'їзду із прилягаючої смуги руху, який вводитиме транспортний потік поза межами з'їзду з основної дороги. Такий варіант вирішення проблеми усуне виниклу конфліктну точку, а рух транспортного потоку регулюватиметься дорожніми знаками пріоритету. Недоліком такого рішення є висока вартість будівництва додаткової смуги руху на опорах. Крім цього таке рішення вимагатиме виділення додаткових площ, що не завжди є можливими, особливо в межах існуючої вулично-дорожньої мережі міста.

Другим варіантом вирішення цієї проблеми є використання дорожніх знаків пріоритету. Такими знаками можуть бути знаки, встановлені на дорозі, що примикає до основної, зокрема знак "Margelane", який повідомляє водіїв про злиття доріг із поєднанням із знаком "Yield", що вказує на те, що потрібно надати перевагу в русі транспорту, що рухається по основній дорозі. Знак пріоритету може бути ще у вигляді червоного трикутника на білому фоні із вершиною спрямованою вертикально вниз. Однак і таке рішення не є оптимальним, оскільки загальмовує транспортний потік, що рухається по прилягаючій смузі зменшуючи його швидкість, а іноді, повністю його зупиняючи. Це призведе до того, що транспортним засобам, щоб переміститись у прогалину між автомобілями, що рухаються в основному потоці із високою швидкістю необхідно буде дуже швидко прискорюватись, що створює дискомфорт при керуванні транспортним засобом та ризики утворення ДТП (рис. 3).

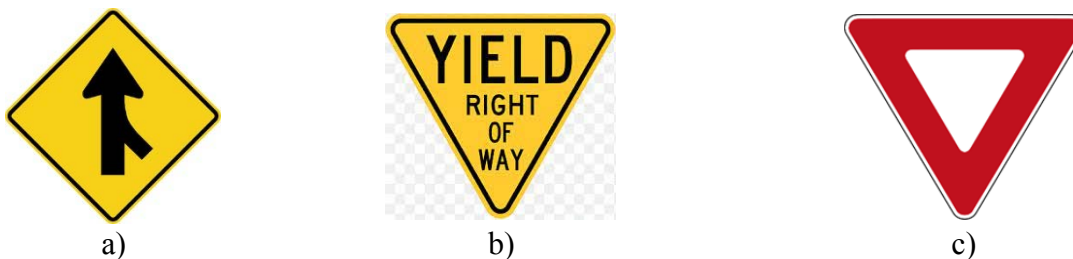


Рисунок 3 – Дорожні знаки для регулювання пріоритетності проїзду транспортних засобів на примикаючих ділянках ВДМ:

*Джерело: розроблено авторами на підставі[7]*

Вирішення описаної проблеми запропоновано здійснювати за допомогою регулювання відстані між транспортними засобами (дистанції), що рухаються у попутних напрямках по основній та прилягаючій дорогах. Таке рішення може бути організоване використанням системи активного (адаптивного) круїз контролю в сучасних автомобілях [5-7]. Таким чином буде забезпечена достатня відстань для здійснення маневру перестроювання у потрібну смугу руху для водіїв транспортних засобів що рухаються по основній та прилягаючій смузі. При цьому не потрібно зменшувати швидкість транспортного потоку.

Третій варіант вирішення цієї проблеми це почерговий дозвіл на здійснення маневру перестроювання між смугами руху. При цьому розділювальна смуга руху між смугами, що розділяє транспортні потоки злиття між прилягаючою та суміжною

смугами повинна забезпечити можливість маневру перелаштування спочатку транспортним засобам, що виїжджають з прилягаючої смуги. При цьому здійснення маневру перелаштування транспортним, що рухаються в основному потоці повинно бути заборонено відповідними засобами регулювання дорожнього руху [8]. Після цього на відстані рівній половині відстані між прилягаючою смугою та смугою відгалуження повинна бути забезпечена можливість аналогічного маневру зі сторони основного транспортного потоку.

**Висновки:** 1. Проаналізовано стан вулично-дорожньої мережі на завантажених ділянках інтенсивного руху міста Калгарі (Канада). Встановлено, що існуюча схема ВДМ на деяких ділянках ВДМ створює потенційну небезпеку утворення заторів або ДТП, оскільки ділянки для маневрування транспортних засобів не врегульовані відповідними засобами регулювання дорожнього руху. Швидкісний режим руху та існуюча схема ВДМ створюють умови при яких у водіїв транспортних засобів є всього 10-15 секунд на оцінку дорожньої обстановки, прийняття рішення та здійснення маневру перелаштування між смугами руху.

2. Запропоновані варіанти вирішення створеної ситуації повинні забезпечити безпеку дорожнього руху на існуючих ділянках ВДМ міст з високою інтенсивністю транспортного потоку. Запропоновані рішення повинні запобігти утворенню ДТП на розглянутих та аналогічних ділянках ВДМ міст з інтенсивним транспортним потоком.

## Список літератури

1. В.Г. Топорков *Формування дорожньо-транспортної мережі з індивідуальними засобами пересування. Building innovations – 2020* : зб. наук. пр. за матеріалами III Міжнар. азерб.-укр. наук.-практ. конф. (1 – 2 черв. 2020 р., Баку – Полтава). Полтава : Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2020. С. 322-325.
2. І. В. Бригадир, І.В. Панова. Роль законодавства та державної політики в мінімізації впливу загроз екологічній безпеці в галузі автомобільного транспорту. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2020. № 4 (91). С. 49-58. DOI:<https://doi.org/10.32631/v.2020.4.04>.
3. Я.В. Шевчук. Зарубіжний досвід використання транспортних моделей в розвитку міських і сільських поселень. *Науковий вісник Ужгородського університету : Серія: Економіка*. Ужгород : УжНУ, 2013. Вип. 3(40). С. 244–252. Бібліогр.: С. 251–252
4. В.В. Рудзінський, В.П. Шумляківський. Дослідження роботи міських маршрутних транспортних засобів, як передумова впровадження технологій інтелектуальних транспортних систем. *Вісник СевНТУ. Сер.: Машиноприладобудування та транспорт*, 2013 (142). С.195-198.
5. Brake Assist. Supports unexpected braking in case of emergency. 2015. URL: [http://www.toyota-global.com/innovation/safety\\_technology/safety\\_technology/technology\\_file/active/brake.html](http://www.toyota-global.com/innovation/safety_technology/safety_technology/technology_file/active/brake.html).
6. Гальмівний шлях при екстремому гальмуванні автомобіля. Он-лайн журнал «Корисні поради» 2015. URL: <http://поради.pp.ua/avto-poradu/623-galmvniy-shlyah-pri-ekstrenomu-galmyvann-avtomoblya.html>.
7. Melbourne launches world-first connected living transport lab. URL: <http://themelbourneengineer.eng.unimelb.edu.au/2017/01/melbourne-launches-world-first-connected-living-transport-lab/> (дата звернення 16.01.2017 р). Назва з екрана.
8. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник / О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін.; за заг. ред. В. П. Поліщука. К.: Знання України, 2014. 467 с.

## References

1. V.G. Toporkov (2020) *Formation of a road and transport network with individual means of transportation. Building innovations - 2020*: coll. of science according to the materials of the III International Azerbaijani-Ukrainian science and practice conf. (June 1 - 2, 2020, Baku - Poltava). – Poltava: Yuri Kondratyuk National University. P. 322-325. [in Ukrainian].

2. I.V. Brigadyr, & I.V. Mr. (2020). The role of legislation and state policy in minimizing the impact of threats to environmental safety in the field of road transport. *Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs*. No. 4 (91). pp. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.32631/v.2020.4.04>. [in Ukrainian].
3. Ya.V. Shevchuk. (2013). *Foreign experience of using transport models in the development of urban and rural settlements*. Scientific Bulletin of Uzhgorod University: Series: Economics. Uzhhorod: UzhNU, Issue 3(40). pp. 244–252. Bibliography: p. 251–252 [in Ukrainian].
4. V.V. Rudzinsky, & V.P. Shumlyakivskyi. (2013). *Study of the operation of urban route vehicles as a prerequisite for the introduction of technologies of intelligent transport systems*. Bulletin of SevNTU. Ser.: Mechanical engineering and transport, (142). P. 195-198. [in Ukrainian].
5. Brake Assist. *Supports unexpected braking in case of emergency*. [Electronic resource] / 2015 - Access mode: [http://www.toyota-global.com/innovation/safety\\_technology/safety\\_technology/technology\\_file/active/brake.html](http://www.toyota-global.com/innovation/safety_technology/safety_technology/technology_file/active/brake.html)
6. *Braking distance during emergency braking of the car*. Online magazine "Useful tips" [Electronic resource] / 2015 - Access mode: <http://porady.pp.ua/avto-poradu/623-galmvniy-shlyah-pri-ekstrenomu-galmyvann-avtomoblya.html>.
7. *Melbourne launches world-first connected living transport lab* [Electronic resource] / Access mode: <http://themelbourneengineer.eng.unimelb.edu.au/2017/01/melbourne-launches-world-first-connected-living-transport-lab/> – (access date 16.01.2017). Title from the screen.
8. *Organization and regulation of traffic*: textbook / O. O. Bakulich, O. P. Dzyuba, V. I. Yeresov, etc.; in general ed. V. P. Polishchuk. - K.: Knowledge of Ukraine, 2014. 467 p.

**Volodymyr Dzyura**, Prof., DSc., **Yuriy Vovk** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mariya Babii**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatoliy Matviyishyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Uliana Plekan**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.  
*Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ukraine*

### **Peculiarities of Regulating the Movement of Vehicles on Specific Sections of the Street and Road Network of Cities with Heavy Traffic Flow**

Potentially dangerous sections of the street and road network of the city of Calgary (Canada) were analyzed and identified based on our own observations. It was established that individual sections of the street-road network form cross traffic flows that create conflict points of confluence and crossing. The small distance between the junction elements leaves drivers with insufficient time to maneuver, which increases the risk of traffic accidents. The described transport problem is typical for large cities with a developed road transport network and high traffic intensity.

Recommendations for traffic regulation on the street-road network of cities with high traffic intensity and speed of traffic flow have been developed. A proposed solution to the problem of adjacent traffic flows changing lanes on a short section of the street-road network. The essence of the proposed solutions to the described transport problem involves both traditional approaches (building additional traffic lanes for maneuvering) and alternative approaches - changing the existing traffic organization using road markings and priority signs, which does not require significant financial investments.

The peculiarity of the proposed solutions is that they provide that the traffic flow moving along the traffic lane that merges with the main traffic flow should not reduce the speed of traffic, which will contribute to its merging with the main traffic flow. Another option involves the use of active cruise control systems on vehicles. The proposed solutions should prevent the occurrence of traffic accidents on the considered and similar sections of the street-road network of cities with intensive traffic flow.

**street and road network, organization of traffic, traffic accident, traffic lanes, intensity of traffic flow**

*Одержано (Received) 23.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

## ЗМІСТ

**Комп'ютерні науки***О.С. Улічев, Л.М. Папіж, О.А. Ревнюк*

Досягнення в тестуванні програмного забезпечення. Наукова перспектива ..... 3

*О.С. Улічев, О.П. Доренський, В.П. Кулагін*

Інноваційні рішення та переваги мікросервісної архітектури програмних продуктів ..... 16

*О.Л. Ляшук, В.А. Готович, В.О. Бонар, В.В. Аулін, А.В. Гриньків, Л.П. Матійчук*

Концепція дистанційної діагностики технічного стану транспортних засобів в процесі їх експлуатації..... 29

**Матеріалознавство***Л.А. Тарандушка, В.С. Ковтуненко*

Дослідження структури матеріалів, що утворюються за випаровування у вакуумі скла системи миш'як-селен для подальшого використання в автомобільній галузі..... 40

**Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології***В.В. Щепін, Д.В. Трушаков, Н.П. Сисоліна, М.О. Федотова, О.А. Козловський, Р.В. Телюта*

Розробка додатку на смартфон для керування пристроєм для покращення психоемоційного стану людини та дослідження економічної ефективності функціонування розробленого пристрою ..... 46

*В.В. Аулін, С.Г. Ковальов, А.В. Гриньків, В.В. Варваров*

Алгоритм оптимізації надійності функціонування та ефективності використання виробничого обладнання методами штучного інтелекту..... 60

**Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка***О. А. Козловський, С. Й. Рендзіняк*

Обґрунтування діагностичних параметрів комплексної системи дистанційного діагностування повітряних ліній на базі БПЛА ..... 68

**Будівництво та цивільна інженерія***С.А. Гудзь, О.Г. Фенко, В.В. Дарієнко, Г.Д. Портнов*

Проектування розкріплених прогонів покриття з урахуванням жорсткості профільованого настилу ..... 80

*М.В. Гаркуша*

Застосування гідроізоляційних покриттів для захисту від корозії дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій..... 91

*В.В. Яцун, І.О. Скринник, О.В. Горпинченко*

Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу на розгінній ділянці пневмотранспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини..... 101

**Галузеве машинобудування**

- О.В. Щербак, А.В. Сумінов, С.Л. Хачатурян*  
Дослідження навантажень несучої системи навантажувача в залежності від параметрів шарнірного з'єднання напіврам ..... 111
- Ю.В. Кулешков, Т.В. Руденко, М.В. Красота, Є.Ю. Штомпель*  
Вдосконалення математичної моделі зубчатого зачеплення шестеренного насосу мобільної техніки..... 119
- А.Є. Дячун, І.Б. Гевко, Р.З. Золотий, С.О. Коваль, О.Б. Дерши, А.О. Брикса*  
Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвєсера з обертовим кожухом..... 133
- І.Б. Гевко, А.Є. Дячун, Р.М. Рогатинський, Т.А. Довбуш, В.М. Бучинський*  
Синтез накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації..... 143
- В.О. Дзюра, Т.Р. Дживак, В.Я. Федів, І.І. Чвартацький*  
Трансформація відхилень від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гідроциліндра при його виготовленні ..... 155
- С.О. Карпушин, В. А. Настоящий, А. А. Тихий, Є. В. Гозбенко, О.В. Русаченко*  
Удосконалення робочих органів будівельних і дорожніх машин застосуванням гумових елементів ..... 164
- С.Л. Хачатурян, С.Г. Ковалевський, О.С. Хачатурян*  
Математичне моделювання поведінки ґрунту в процесі проколу ..... 179

**Агроінженерія**

- О.О. Окунський, О.П. Цьонь, Г.Б. Цьонь, Р.Я. Леишук, О.А. Юр'єв*  
Обґрунтування конструктивних параметрів дообрізувача гички з активним ножом..... 186
- Б.О. Блащак, А.В. Бабій*  
Обґрунтування окремих конструктивно-технологічних параметрів картоплепосадочної машини ..... 192
- Andrii Babii, Ivan Holovetskyi*  
Engineering method of studying the kinematic parameters of the working body of the potato harvesting machine..... 200

**Автомобільний транспорт**

- Л.А. Тарандушка, М.П. Рудь, О.В. Батраченко*  
Підвищення безпеки дорожнього руху шляхом обчислювального аналізу аеродинамічної взаємодії між вантажівкою та мотоциклом..... 213

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>І.А. Шльончак, О.В. Батраченко</i><br>Утилізація автомобільних шин в українській перспективі .....                                                                                                                    | 221 |
| <i>О.Л. Ляшук, У.М. Плекан, О.П. Цьонь, Ю.Я. Вовк, Н.Я. Рожко</i><br>Аналіз впливу осьових навантажень на стан автомобільних доріг .....                                                                                 | 227 |
| <i>О.В. Іванкова, О.А. Бурлака, В.Ю. Бартош</i><br>Матеріали та технології для відновлення зношених поверхонь автомобільних деталей.....                                                                                 | 236 |
| <b>Прикладна механіка</b>                                                                                                                                                                                                |     |
| <i>В.В. Аулін, О.В. Кузик, А.А. Тихий, С.В. Лисенко</i><br>Механізми внутрішнього та зовнішнього тертя та їх вплив на процеси зношування трибоспряження деталей машин .....                                              | 250 |
| <b>Транспортні технології (за видами)</b>                                                                                                                                                                                |     |
| <i>Д.О. Кульова</i><br>Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на транспорті.....                                                                                                    | 261 |
| <i>В.В. Аулін, С.Ю. Тищенко, А.В. Гриньків</i><br>Інноваційні рішення в складській логістиці .....                                                                                                                       | 270 |
| <i>Uliana Plekan, Viktor Aulin, Oleg Tson, Volodymyr Dzyura, Anatolii Matviishyn</i><br>Logistics Costs of a Transport Enterprise: Organizational Aspects .....                                                          | 286 |
| <i>Lyudmyla Tarandushka, Olexandr Kravchenko, Yan Tarandushka</i><br>Exploring Opportunities to Improve freight Transportation .....                                                                                     | 294 |
| <i>В.О. Дзюра, Ю.Я. Вовк, М.В. Бабій, А.Й. Матвійшин, У.М. Плекан</i><br>Особливості регулювання руху транспортних засобів на специфічних ділянках вулично-дорожньої мережі міст з інтенсивним транспортним потоком..... | 300 |

## CONTENT

### Computer Science

|                                                                                                                                  |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <i>Oleksandr Ulichev, Lyubomyr Papizh, Oleksandr Revniuk</i><br>Advancements in Software Testing: A Scientific Perspective ..... | 3 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Oleksandr Ulichev, Oleksandr Dorenskyi, Victor Kulahin</i><br>Innovative Solutions and Benefits of Microservice Architecture for<br>Software Products ..... | 16 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Oleg Liashuk, Volodymyr Hotovych, Vitalii Bonar, Viktor Aulin, Andrey Hrinkiv,<br/>Liubomyr Matiichuk</i><br>The Concept of Remote Diagnostics of the Technical Condition of Vehicles<br>During their Operation ..... | 29 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Material Science

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Liudmyla Tarandushka, Victor Kovtunencko</i><br>Study of Structure of Materials Which are Formed by Evaporation<br>off Glass Arsenic-Selenium System for Further Use in the Automotive Industry ..... | 40 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Automation and Computer Integrated Technologies

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Valerii Shchiepin, Dmitro Trushakov, Nataliia Sysolina, Marianna Fedotova,<br/>Oleksandr Kozlovskyi, Ruslan Teliuta</i><br>Development of a Smartphone Application for Controlling the Device to Improve<br>the Psycho-emotional State of a Person and Research the Effectiveness<br>of the Developed Device ..... | 46 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Victor Aulin, Serhiy Kovalov, Andriy Hryniv, Valeriy Varvarov</i><br>Algorithm for Optimizing the Reliability of Operation and Efficiency of Use<br>of Production Equipment Using Artificial Intelligence Methods ..... | 60 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Oleksandr Kozlovskyi, Serhiy Rendzinyak</i><br>Justification of Diagnostic Parameters for a Comprehensive UAV-based Remote Diagnostic<br>System for Overhead Power lines ..... | 68 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Construction and Civil Engineering

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Serhii Hudz, Oleksii Fenko, Viktor Dariienko, Hennadii Portnov</i><br>Design of Restrained Roof Purlins, Taking Into Account the Stiffness of the<br>Profiled deck ..... | 80 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Mykola Harkusha</i><br>Application of Waterproofing Coatings for Corrosion Protection of Road<br>Culverts Made of Corrugated Metal Structures ..... | 91 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Volodymyr Yatsun, Ivan Skrynnik, Olha Horpynchenko</i><br>Study of the Mechanics of the Movement of Loose Lumpy Material in the<br>Acceleration Section of the Pneumo-transport Pipeline of the<br>Vibration-pneumotransport Machine of Cyclic action ..... | 101 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**Industry Engineering***Oleh Sherbak, Andrey Suminov, Serhiy Khachaturian*Study of the Loads of the Load-carrying System Depending on the Parameters  
of the Hinged Connection of the Half-frames ..... 111*Yuriy Kuleshkov, Timofey Rudenko, Mikhail Krasota, Yevheniy Shtompel*

The Features of Cog Engagement's Functioning of Gear Hydraulic Machines ..... 119

*Andrii Diachun, Ivan Hevko, Roman Zoloty, Serhii Koval, Oleg Derysh,  
Andrii Bryksa*The Results of Experimental Studies of the Quality of Bulk Materials Mixing  
by an Automated Installation of a Screw Conveyor with a Rotating Casing..... 133*Ivan Hevko, Andrii Diachun, Roman Rohatynskyi, Taras Dovbush,  
Volodymyr Buchynskyi*

Synthesis of Storage and Loading Hoppers with Elements of Automation..... 143

*Volodymyr Dzyura, Taras Dzhyvak, Vasyl Fediv, Ihor Chvartazkuy*Transformation of Deviations from the Roundness of the Inner Cylindrical  
Surface of the Hydraulic Cylinder During Its Manufacture..... 155*Serhii Karpushyn, Vladyslav Nastoishchyi, Andrii Tykhyi, Yevhen Hozbenko,  
Oleksandr Rusachenko*Improvement of the Working Bodies of Construction and Road Machines  
Using Rubber Elements..... 164*Serhiy Khachaturyan, Serhiy Kovalevskyi, Olena Khachaturyan*

Mathematical Modeling of Soil Behavior in the Process of Puncture ..... 179

**Agroengineering***Oleksandr Okunskiy, Oleg Tson, Anna Tson, Roman Leshchuk, Oleksandr Yuriev*Justification of the Design Parameters of the Additional Trimmer with  
an Active Knife ..... 186*Bohdan Blashchak, Andrii Babii*Justification of Individual Structural and Technological Parameters  
of the Potato Planting Machine ..... 192*Andrii Babii, Ivan Holovetskyi*Engineering method of studying the kinematic parameters of the working  
body of the potato harvesting machine ..... 200**Road Transport***Liudmyla Tarandushka, Maksym Rud, Oleksandr Batrachenko*Improving Road Safety Through Computational Analysis of the Aerodynamic  
Interaction Between a Truck and a Motorcycle ..... 213*Ihor Shlonchak, Oleksandr Batrachenko*

The Recycling of Car Tires in the Ukrainian Perspective..... 221

|                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Oleg Lyashuk, Uliana Plekan, Oleg Tson, Yurii Vovk, Nataliya Rozhko</i><br>Analysis of the Impact of Axle Loads on the Condition of Roads .....                                                                                            | 227 |
| <i>Olena Ivankova, Alexei Burlaka, Vitaly Bartosh</i><br>Materials and Technologies for Restoration of Worn Surfaces of Automobile Parts.....                                                                                                 | 236 |
| <b>Applied Mechanics</b>                                                                                                                                                                                                                      |     |
| <i>Viktor Aulin, Oleksandr Kuzyk, Andrii Tykhyi, Serhii Lysenko, Inna Zhylova</i><br>Mechanisms of Internal and External Friction and their Influence on Wear<br>Processes of Tribo-coupling of Machine Parts .....                           | 250 |
| <b>Transport Technologies (by Types)</b>                                                                                                                                                                                                      |     |
| <i>Daria Kulova</i><br>Application of a Conceptual Risk Management Approach in the Field of Traffic<br>Safety in Transport .....                                                                                                              | 261 |
| <i>Victor Aulin, Sergii Tyshchenko, Andriy Hrynkiv</i><br>Innovative Solutions in Warehouse Logistics .....                                                                                                                                   | 270 |
| <i>Uliana Plekan, Viktor Aulin, Oleg Tson, Volodymyr Dzyura, Anatolii Matviishyn</i><br>Logistics Costs of a Transport Enterprise: Organizational Aspects .....                                                                               | 286 |
| <i>Lyudmila Tarandushka, O.P. Kravchenko, J.I. Tarandushka</i><br>Exploring Opportunities to Improve freight Transportation .....                                                                                                             | 294 |
| <i>Volodymyr Dzyura, Yuriy Vovk, Mariya Babii, Anatoliy Matviyishyn, Uliana Plekan</i><br>Peculiarities of Regulating the Movement of Vehicles on Specific Sections of the<br>Street and Road Network of Cities with Heavy Traffic Flow ..... | 300 |

**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. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. \*
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

**Адреса для надсилання:** stat\_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

#### **ДОВІДКА ПРО АВТОРА** **українською та англійською мовами**

|                                                                    | Українською | Англійською |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Прізвище, ім'я, по-батькові:</b>                                |             |             |
| <b>Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:</b> |             |             |
| <b>Посада (повна назва, без аббревіатур):</b>                      |             |             |
| <b>Наукова ступінь:</b>                                            |             |             |
| <b>Вчене звання:</b>                                               |             |             |
| <b>Назва статті:</b>                                               |             |             |
| <b>*Спеціальність:</b>                                             |             |             |
| <b>Адреса для надсилання збірнику:</b>                             |             |             |
| <b>Контактні телефони (бажано мобільний):</b>                      |             |             |
| <b>E-mail:</b>                                                     |             |             |
| <b>ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)</b>                              |             |             |

\* – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 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 10(41)**  
**Частина I**

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка Н. Стеннік

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»  
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.  
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25  
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 28.10.2024р. Формат 60х84/8. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 39,13  
Тираж 300 прим. Зам. № 0812