

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 11(42)
Частина I**

Кропивницький • 2025

ISSN 2664-262X

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

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Under the general editorship of M. Chernovol

Founded in 1997

**Issue 11(42)
Part I**

Kropyvnytskyi • 2025

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 31 березня 2025 року № 7.

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»); Бабій А.В., д-р техн. наук, проф.; Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); 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.; Дідик О.К., 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.; 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.; Осадний 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.; Рубан С.А., канд. техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук, доц.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук співр. (Німеччина); Тарадушка 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

ЦНТУ – 155!

2025 рік є ювілейним для Центральноукраїнського національного технічного університету. Нам – 155 років. Ми – найстаріший заклад вищої освіти регіону.

Університет веде свої витоки від Єлисаветградського вищого земського реального училища, перше засідання правління якого відбулося 18 квітня (5 квітня за юліанським календарем) 1870 року. Статус урядового навчального закладу ЄЗРУ отримало 3 листопада (20 жовтня за юліанським календарем) 1882 року. Свідоцтво про закінчення реального училища (гімназії) давало право на прийняття на державну або військову службу. Певний час ЄЗРУ очолював відомий вчений Михайло Завадський, засновник першого в Україні педагогічного часопису «Педагогічний вісник», який видавався у ЄЗРУ. Навчальний процес у ЄЗРУ забезпечувала плеяда талановитих педагогів і вчених, зокрема, видатний археолог Володимир Ястребов, метеоролог Гаврило Близнін, академік портретного живопису Петро Крестоносцев, який очолював також і Вечірні рисувальні і креслярські класи при ЄЗРУ. Ці класи стали визначним освітньо-культурним осередком у регіоні, адже навчалися в ньому не лише реалісти, але й вихованці інших навчальних закладів.

Єлисаветградське реальне училище дало путівку в життя цілій плеяді видатних особистостей; серед них – академік Георгій Проскура (засновник Харківського авіаційного інституту); гірничий інженер Мартін Шимановський (директор-розпорядник акціонерного «Товариства криворізьких залізних руд»); найвидатніший український меценат Євген Чикаленко; театральні діячі Микола Садовський, Панас Саксаганський, Гнат Юра; класики української літератури ХХ ст. Євген Маланюк, Юрій Яновський; білоруський драматург Ригор Кобець; музичні діячі Генріх Нейгауз, Фелікс Блуменфельд, Кароль Шимановський (польський композитор), художники Самійло Дудін, Олександр Осмьоркін, Петро Покажевський; інженер та етнограф Михайло Васильєв, Олександр Тарковський (батько поета Арсенія Тарковського), Володимир Тьомкін (єврейський релігійний діяч, один із засновників сіонізму і творців держави Ізраїль).

Реальне училище стало не лише першим освітнім закладом із підготовки майбутніх інженерно-технічних кадрів в регіоні, а й першим закладом із підготовки учителів, адже на його базі діяли педагогічні курси. Відтоді навчальний заклад зазнав ряду значних трансформацій та реорганізацій: Земське реальне училище — Вечірній робітничий технікум — Вечірній інститут сільськогосподарського машинобудування — Технікум сільськогосподарського машинобудування — Вечірнє відділення, а згодом філія Харківського політехнічного інституту — Інститут сільськогосподарського машинобудування — Державний технічний університет — Національний технічний університет.

Сьогодні Центральноукраїнський національний технічний університет – потужний освітній і науковий центр в Україні. Випускники нашого університету є відомими вченими, промисловцями, економістами, управлінцями та державними діячами, вони визначатимуть образ України в майбутньому.

***Ректор Центральноукраїнського національного технічного університету
проф. Володимир Кропівний***

Central Ukrainian National Technical University – 155!

2025 is the anniversary year for Central Ukrainian National Technical University. We are 155 years old. We are the oldest higher education institution in the region.

The university traces its origins to Yelisavetgrad Higher Zemstvo Real School. First meeting of the Board of Directors of which was held on April 18 (5 April, Julian calendar) 1870. Yelisavetgrad Higher Zemstvo Real School was granted the status of a governmental educational institution on 3 November (20 October, Julian calendar) 1882. The certificate of completion of the real school (gymnasium) gave the right to be recruited for civil or military service. For some time, Higher Zemstvo Real School was headed by the renowned scholar Mykhailo Zavadskyi, founder of the first pedagogical journal in Ukraine, Pedagogical Herald, which was published at Higher Zemstvo Real School. Educational process at the school was provided by a galaxy of talented teachers and scientists, particularly, a prominent archaeologist Volodymyr Yastrebov, meteorologist Havrylo Blyzin, academician of portrait painting Petro Krestonostsev, who also headed the evening drawing and drafting classes at the school. These classes became a prominent educational and cultural centre in the region, as not only realists, but also students of other educational institutions studied there.

Yelisavethrad Real School gave a start in life to a whole cohort of prominent personalities, including academician Heorhii Proskura (founder of Kharkiv Aviation Institute); mining engineer Martin Shymanovskyi (managing director of Kryvyi Rih Iron Ore Company); the most prominent Ukrainian philanthropist Yevhen Chykalenko; theatre professionals Mykola Sadovskyi, Panas Saksahanskyi, Hnat Yura; classics of 20th century Ukrainian literature. Yevhen Malaniuk, Yuriy Yanovskyi; Belarusian playwright Ryhor Kobets; musicians Heinrich Neuhaus, Felix Blumenfeld, Karol Szymanowski (Polish composer), artists Samiilo Dudin, Oleksandr Osmerkin, Petro Pokazhevskyi; engineer and ethnographer Mikhailo Vasiliev, Oleksandr Tarkovskyi (father of the poet Arseniy Tarkovskyi), Volodymyr Tiomkin (Jewish religious leader, one of the founders of Zionism and creators of the state of Israel).

The Real School became not only the first educational institution to train future engineering and technical personnel in the region, but also the first teacher training institution, as it offered pedagogical courses. Since then, the school has undergone a number of significant transformations and reorganisations: Zemstvo Real School – Evening Workers' College – Evening Institute of Agricultural Engineering – College of Agricultural Engineering – Evening Department, and later a branch of Kharkiv Polytechnic Institute – Institute of Agricultural Engineering – State Technical University – National Technical University.

Today, Central Ukrainian National Technical University is a powerful educational, training and research centre in Ukraine. Our university graduates are well-known scientists, industrialists, economists, managers and statesmen, and they will shape the image of Ukraine in future.

***Rector of Central Ukrainian National Technical University
Prof. Volodymyr Kropivnyi***

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.8+004.94

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.5-13](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.5-13)

Д. А. Білоус, А. В. Козловський, доц., канд. техн. наук
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна
e-mail: dmytro.bilous@gmail.com, akozlovskiy@vntu.edu.ua

Загальна модель бази знань інформаційної технології оцінки складності розробки програмного забезпечення із застосуванням SaaS/PaaS платформ

Критичним фактором успішного управління проектами та ефективного планування є оцінювання складності та зусиль для розробки програмного забезпечення. Використання стандартних для індустрії методів, таких як аналіз функціональних точок, є ефективним засобом підвищення точності оцінювання зусиль при одночасному зменшенні вартості безпосередньо процесу оцінювання. Водночас, стандартні методи, більшість з яких була розроблена декілька десятиліть тому, не є достатньо адаптованими для сучасних реалій природи розробки програмного забезпечення з використанням гнучких підходів та готових або типових рішень. У роботі запропоновані моделі представлення знань з поєднанням продукційної та фреймової моделей для вирішення задачі оцінки складності та трудомісткості розробки програмного забезпечення із застосування SaaS (Software as a Service) та PaaS (Platform as a service) рішень. Розроблено модель бази знань, яка враховує особливості поєднання фреймової та продукційної моделей та забезпечує сумісність із методом аналізу функціональних точок (Function Point Analysis).

Розроблені моделі та їх взаємодії можуть стати основою для розробки моделі прийняття рішень у інформаційній технології оцінки складності розробки програмного забезпечення із врахування факторів середовища та критеріїв оцінювання. Застосування отриманих моделей надасть змогу створити алгоритми автоматизованої оцінки складності розробки програмного забезпечення в умовах неповної визначеності функціональних вимог.

оцінка складності розробки програмного забезпечення, модель знань, фреймова модель, продукційна модель, аналіз функціональних точок

Постановка проблеми. Управління витратами та планування ресурсів у розробці програмного забезпечення значною мірою залежить від точності оцінки зусиль, необхідних для реалізації функціоналу. Одним із найбільш розповсюджених методів оцінки складності є Function Point Analysis (FPA), який дозволяє визначати розмір програмного продукту на основі його функціональних можливостей. Проте класична методологія FPA має ряд обмежень, що ускладнюють її застосування в умовах використання SaaS/PaaS-платформ та сучасних підходів до розробки програмного забезпечення. Основні проблеми, що виникають:

– нечіткість вимог на ранніх етапах. Методології, такі як Agile, передбачають ітеративне уточнення вимог, що створює труднощі для класичних підходів FPA, які орієнтовані на стабільну специфікацію функціоналу. На всіх стадіях розробки, особливо на початкових, типовими є нечіткість, неповнота або недостовірність даних щодо функціональних вимог. В результаті, оцінка FPA може не відображати реальну складність розробки таких функцій.

– значні витрати на експертне оцінювання. Точний аналіз складності ПЗ вимагає залучення досвідчених спеціалістів, що збільшує вартість оцінки.

– недостатня адаптація до використання платформних рішень. Багато сучасних систем будуються на основі конфігурації готових сервісів (SaaS/PaaS), однак традиційний FPA використовує кінцеву множину функцій транзакцій та даних, які та

виключно які використовуються для обчислення складності, тому не диференціює використання частково готових рішень від повноцінного процесу розробки, що може призводити до неточних прогнозів.

– складність оцінки професійних сервісів та підтримки: FPA не враховує зусиль, необхідних для початкової конфігурації, адміністрування, підтримки та MACD-модифікації (Moves, Adds, Changes and Deletes) програмного забезпечення протягом його життєвого циклу. Статистичні дані свідчать, що з кінця вісімдесятих років більшість організацій витрачають щонайменше 50% своїх фінансових ресурсів на супровід програмних продуктів. За останні двадцять років ця частка у деяких сферах зросла до 80-95%. Це підкреслює важливість досліджень у галузі підтримки програмного забезпечення. Оскільки професійний сервіс часто є суттєвою, а подекуди і єдиною, складовою проектною діяльністю, ігнорування цього аспекту є значним недоліком.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження присвячені вдосконаленню методів оцінки зусиль у розробці програмного забезпечення шляхом використання нечіткої логіки, нейронних мереж та їх комбінацій. У роботі [1] представлено систематичний огляд літератури та досліджень, автори роблять фокус на визначення актуальності використання методу аналізу функціональних точок, типових проблем, що виникають при його використанні, раціональності та ефективності запропонованих покращень. Автори [1] виявили, що методи повторного калібрування ваг і складності на основі штучного інтелекту мають багатообіцяючі результати, з підвищенням точності оцінки на 13-30% порівняно зі стандартним методом FPA. Водночас, фундаментальні проблеми, наприклад технологічна незалежність, особливо у розрізі застосування готових чи автоматизованих рішень, залишаються невирішеними.

У роботі [2] розглядається використання методів машинного навчання для оцінки показників функціонального розміру програмного забезпечення як альтернатива більш традиційним підходам, таким як метод високорівневого аналізу функціональних точок (High-level FPA, NESMA method). Дослідники провели емпіричне дослідження, використовуючи великий набір даних предикторів функціонального розміру, навчаючи та оцінюючи три моделі машинного навчання: випадкові ліси, опорну векторну регресію та нейронні мережі. Автори демонструють, що методи машинного навчання можуть досягти рівня точності, порівнянного з усталеними методами оцінювання, такими як FPA високого рівня, вимагаючи меншого рівня достовірності та точності вхідних даних про програмний проект.

Дослідження [3] представляє керований даними підхід до покращення оцінки зусиль програмного забезпечення шляхом поєднання логарифмованих формул FPA/PDR, вдосконаленої техніки регресії (Adam Optimizer) і перехресної перевірки. Результати демонструють ефективність запропонованого методу Adj-Effort у забезпеченні більш точних і надійних прогнозів зусиль порівняно з існуючими підходами. Суттєвим здобутком роботи є формалізація набору критеріїв ефективності, який можна використовувати для майбутніх досліджень.

Автори [4] аналізують нечітку модель із використанням субтрактивної кластеризації як підходу до подолання обмежень, пов'язаних із каскадними нечіткими логічними контролерами. Ця методика спрямована на подальше скорочення бази правил і покращення оцінок зусиль розробки програмного забезпечення. Дослідження вивчає техніку кластеризації шляхом поділу даних на кластери, а потім представлення кожного кластера за допомогою одного правила, ефективно мінімізуючи базу правил.

Робота доводить, що застосування нечіткої логіки для оцінки зусиль програмного забезпечення, зокрема за допомогою використання каскадного підходу і субтрактивної кластеризації, показує багатообіцяючі результати в підвищенні точності та ефективності оцінки зусиль розробки програмного забезпечення.

Робота [5] містить детальне дослідження нечітких множин, лінгвістичних змінних і систем нечіткого висновку, відзначає концепцію нечіткої логіки як ефективного інструменту для обробки неповноти даних і невизначеності вхідних параметрів у ранніх моделях оцінки програмного забезпечення. Автори доводять переваги нечітких систем, систем, заснованих на знаннях, і їх нелінійне відображення між вхідними та вихідними векторами.

Роботи [6-9] розглядають застосування методів нечіткої логіки для підвищення ефективності і точності методів оцінки складності розробки програмного забезпечення та керування ризиками в IT-проєктах. Автори доходять висновку про перспективність застосування нейронечітких моделей для калібрування значень вагових коефіцієнтів компонентів функціональних точок і наголошують на необхідності постійної переоцінки в залежності від фактичними витратами у завершених проєктах. Крім того, зазначені роботи підкреслюють перспективність застосування підходів застосування розмірних систем оцінювання складності та витрат на розробку, але лише за умови їх адаптації до реалії поточного середовища.

В статті [10] представлено модель, засновану на техніках глибокого та машинного навчання із поєднанням згорткових нейронних мереж і алгоритму рою частинок для оцінку кінцевої вартості розробки програмного забезпечення. Автори використовують критерії оцінювання аналогічні до наведених у роботі [3] і досягають суттєвого підвищення ефективності традиційних методів. У статті підкреслюється актуальність сучасних методів оцінки вартості програмного забезпечення та окреслюються майбутні напрямки досліджень для усунення обмежень і підвищення практичної користі запропонованої моделі в динамічних середовищах розробки програмного забезпечення.

Задача формалізації нечітких функціональних вимог на ранніх стадіях життєвого циклу проєктів з розробки програмного забезпечення за допомогою моделей-трансформерів розглядається авторами роботи [11]. Отримані результати є перспективними і можуть дозволити розширення запропонованого підходу на інші сфери.

Отже, більшість останніх досліджень фокусується на усуненні або мінімізації впливу факторів нечіткості або неповної визначеності даних при застосуванні класичних методів квантифікованої оцінки обсягу, складності та трудомісткості розробки програмного забезпечення із застосуванням сучасних підходів та здобутків у галузі машинного навчання, таких як нейронні мережі, нечітка логіка, традиційні алгоритмічні підходи та їх поєднання. Аналіз публікацій показує, що застосування наведених підходів дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу оцінки складності програмного забезпечення. Водночас, слід зазначити, що більшість досліджень зосереджені на підвищенні ефективності класичних методів оцінки зусиль для традиційної розробки повного циклу. Їх застосування у сучасному IT-ландшафті, який значною мірою орієнтований на професійні сервіси, SaaS і PaaS, є обмеженим [12]. Більшість моделей не враховують адаптивні методи розгортання, використання готових платформних сервісів та складність інтеграції в існуючі екосистеми. Це підтверджує необхідність розробки підходу, який дозволить оцінювати складність

реалізації функціональних вимог з урахуванням специфіки сучасних програмних архітектур і із застосуванням моделей нечіткої логіки та нейронних мереж [13].

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є розробка базової моделі знань інформаційної технології для оцінки складності та трудомісткості розробки програмних продуктів з використанням SaaS/PaaS рішень. Основою цієї моделі стане комбінована структура знань, що поєднує фреймову та продукційну моделі, дозволяючи ефективно представити вимоги та механізми їхнього виконання. Основні завдання дослідження:

- Вибір базової моделі представлення знань при прийнятті рішень щодо складності, обсягів та трудомісткості розробки і впровадження програмного забезпечення.

- Побудова загальної моделі знань із використанням фреймової та продукційної моделей, що забезпечить ефективне збереження, оновлення та використання знань у процесі оцінювання.

- Побудова загальної моделі прийняття рішень для задачі оцінки складності програмних продуктів, включаючи конфігурацію, інтеграцію та розгортання на основі платформних сервісів (SaaS/PaaS).

Запропоновані моделі мають дозволити створити інформаційну технологію підтримки прийняття рішень, яка забезпечить точну оцінку трудомісткості розробки та стане основою для ефективного керування програмним продуктом у сучасних умовах розробки.

Виклад основного матеріалу. В якості моделі знань для представлення предметної області, що розглядається, та відображення взаємозв'язків між сутностями, пропонується використання поєднання продукційної і фреймової моделей. Авторами роботи [14] була розглянута фреймова модель для зберігання та обробки інформації про вимоги до створення програмних систем, яка містить такі основні компоненти: фрейми вимог, фрейми реалізації, фрейми контексту та фрейми типових для FPA сутностей. Базова фреймова модель знань для предметної області, що розглядається, наведена на рисунку 1.

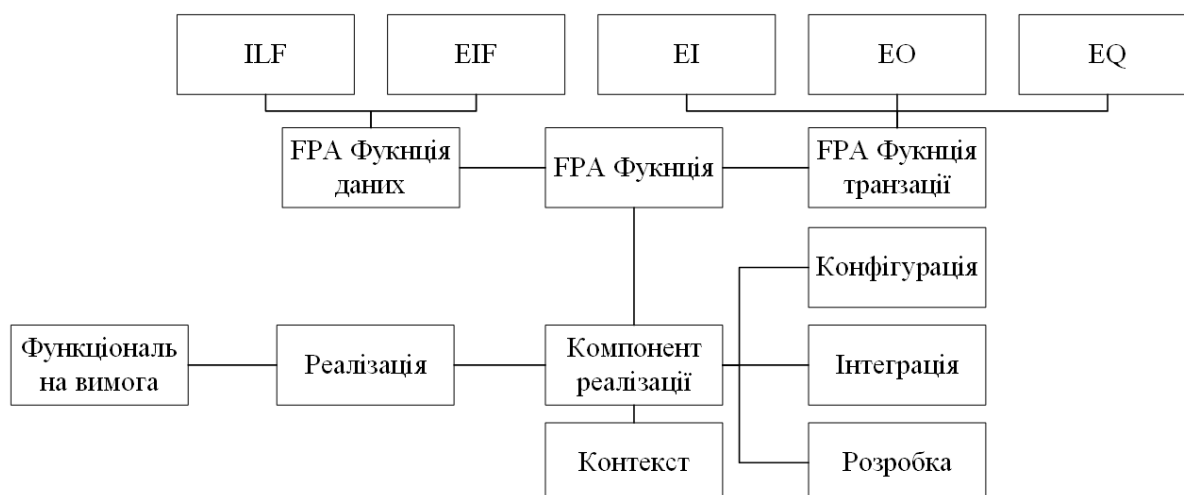


Рисунок 1 – Базова фреймова модель знань

Джерело: розроблено авторами

Типовим завданням при проведенні будь-якої експертної оцінки, а особливо в області оцінки розміру та відповідних трудовитрат на розробку програмного

забезпечення, є використання набутого досвіду з розробки аналогічних або сумісних програмних продуктів. Зазначений досвід складається з певного набору порад, правил та рекомендації щодо аспектів оцінювання, які потрібно враховувати в разі аналізу вимог певного типу або елементарного фрагменту вимог. Такі апріорні дані можна формалізувати у вигляді множини правил-продукції. Відомим недоліком продукційних моделей знань є вірогідність надлишковості за умови використання виключно продукцій звичайного вигляду і нехтуванням появи дублювання умов.

В предметній області оцінки складності розробки програмного забезпечення з врахуванням набутого досвіду та із застосуванням готових рішень або з повторним використанням вже розроблених рішень, доцільно для організації знань застосувати поєднання продукційної та фреймової моделей, що буде мати наступні переваги кожної із складових:

- Простота реалізації та поступової модифікації при додаванні, видаленні, редагуванні та калібруванні знань.
- Можливість застосування наслідування у фреймовій частині знань.
- Відсутність необхідності аналізу складних структур даних у продукційній частині знань, і, як наслідок, зменшення алгоритмічної складності кінцевого методу прийняття рішень.
- Зменшення кількості правил продукції та результуючої надлишковості за рахунок використання фреймової складової.
- Адаптованість та легкість у використанні та сприйнятті людиною-експертом.

Важливим аспектом кінцевої інформаційної технології для оцінювання складності розробки програмного забезпечення є її пристосування до обробки нечітких або неповних вхідних даних, а також введення характеристики впевненості у коректності рекомендації, яка б базувалася на набутому досвіду, мала широкий діапазон для калібрування та могла б бути легко інтерпретована кінцевим користувачем.

Виходячи з вищенаведеного, загальну модель бази знань для класу задач оцінювання складності розробки програмного забезпечення, що розглядається, представимо у вигляді множини:

$$Z = \{Z_f, Z_p\} \quad (1)$$

де Z – поле знань,

Z_f – фреймова компонента поля знань,

Z_p – продукційна компонента поля знань.

У свою чергу, продукційна компонента поля знань складається із множини правил-продукції:

$$Z_p = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (2)$$

де кожне із правил продукції має наступний вигляд:

$$P_i: (r)S; P; A \rightarrow B; R, (i = 1 \dots n) \quad (3)$$

де r – ім'я продукції,

S – сфера застосування продукції, за допомогою якою створено можливість структурувати множину правил-продукції,

P – тригер або умова застосування ядра продукції,

$A \rightarrow B$ – ядро продукції,

R – постумови продукції.

Як було зазначено вище, оптимізація процесу виведення та зменшення алгоритмічної складності є однією із ключовим умов інформаційної технології, що проектується. Одним із підходів для досягнення цієї умови є виділення серед всієї множини правил продукції у базі знань активної та пасивної частин, яке було запропоновано у [15]. За рахунок застосування даного підходу досягається зменшення кількості правил продукції, які будуть розглядатися у кожен конкретний момент часу, за рахунок постійної структуризації правил продукції.

Фреймова компонента поля знань у стандартному підході складається із множини фреймів, кожен з яких має один із чотирьох типів: фрейм-структура, фрейм-ситуація, фрейм-роль, фрейм-сценарій.

Для задачі, що розглядається, найбільш ефективним вбачається використання фреймів-структур для опису множини стійких сутностей із сталим набором властивостей і використання наслідування для представлення знань з певною структурною ієрархією. Водночас, використання фреймів-ролей, фреймів-ситуацій і фреймів-сценаріїв є недоречним через специфіку предметної області та використання продукційної компоненти бази знань для представлення знань подібного типу.

Таким чином, структура бази знань схематично представлена на рисунку 2.

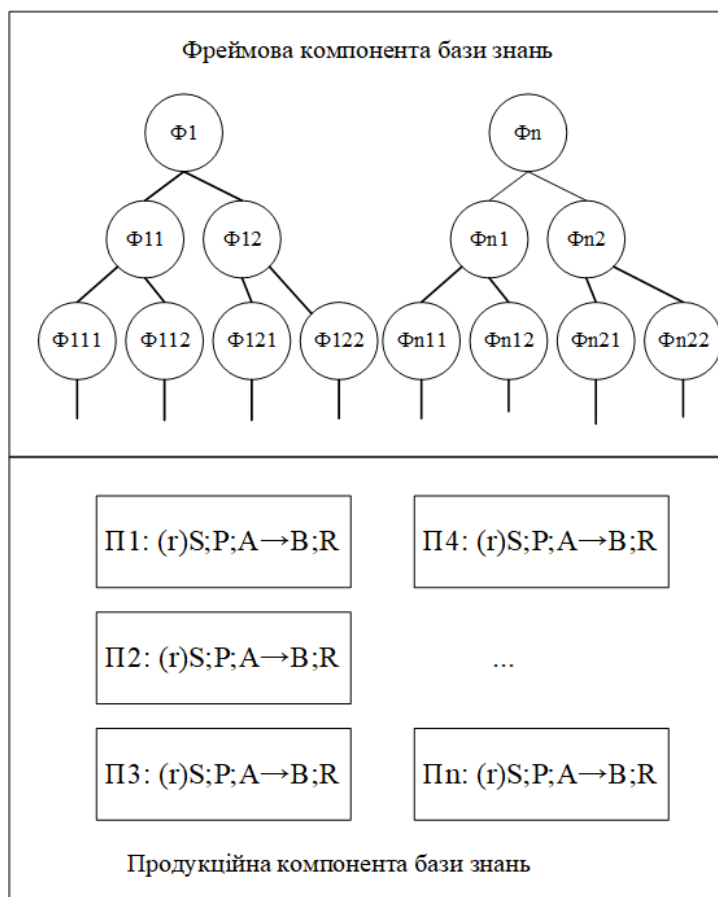


Рисунок 2 – Структура бази знань інформаційної технології оцінки складності розробки програмного забезпечення

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Процес оцінювання складності та планування зусиль є невід’ємною складовою управління життєвим циклом розробки програмного забезпечення. Сучасні

тенденції у сфері оцінки складності трудомісткості розробки програмного забезпечення демонструють зростаючу потребу в адаптивних моделях, що враховують специфіку використання SaaS/PaaS-рішень та гнучких підходів до розробки. Традиційні методи, такі як FPA, залишаються ключовими в оцінці складності програмних систем, проте вони не враховують особливості інтеграції, налаштування та використання готових платформних рішень, що може призводити до завищених або некоректних оцінок витрат і ресурсів.

У статті було запропоновано модель знань для інформаційної технології оцінки функціональних вимог, яка поєднує фреймовий та продукційний підходи для більш точного моделювання знань та прийняття рішень. Основні результати дослідження включають:

– Формалізацію базової моделі, що враховує різні аспекти реалізації програмних рішень, зокрема традиційну розробку, конфігурацію та інтеграцію платформних сервісів.

– Розробку загальної моделі знань на основі гібридного підходу з поєднанням фреймової та продукційної компонент, яка дозволяє зберігати, оновлювати та аналізувати інформацію про вимоги, їхню складність та зв'язки з контекстними факторами.

– Забезпечення можливості впровадження механізму зворотного зв'язку, що використовує історичні дані для покращення точності оцінки складності та адаптації моделі до нових умов.

Запропонований підхід дозволяє більш точно оцінювати трудомісткість реалізації функціональних вимог з урахуванням контексту їх виконання, що особливо важливо для сучасних IT-проектів. Крім того, поєднання фреймової та продукційної моделей створює основу для подальшої інтеграції з методами штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесу оцінки зусиль.

Перспективи подальших досліджень включають розробку та формалізацію моделі прийняття рішень, експериментальні дослідження ефективності запропонованої моделі відносно традиційних підходів, розширення запропонованої моделі через використання нечіткої логіки та нейронних мереж для динамічного коригування оцінки складності залежно від змін у вимогах. Також доцільним є дослідження можливостей впровадження розробленої інформаційної технології у системи підтримки прийняття рішень для керування програмними продуктами та ресурсами.

Список літератури

1. de Freitas Junior M., Fantinato M., Sun, V. Improvements to the Function Point Analysis Method: A Systematic Literature Review. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2015. Vol. 62, №4, P. 495-506. URL: <https://doi.org/10.1109/TEM.2015.2453354> (дата звернення: 22.02.2025).
2. Lavazza L., Locoro A., Liu G. Estimating software functional size via machine learning. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2023. Vol. 32, №5. URL: <https://doi.org/10.1145/3582575> (дата звернення: 22.02.2025).
3. Hoc H. T., Hai V. V., Nhung H. L. T. K. An approach to adjust effort estimation of function point analysis. *Software Engineering and Algorithms*. 2021. P. 522-537. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77442-4_45 (дата звернення: 22.02.2025).
4. Sree P. R., Ramesh S. N. S. V. S. C. Improving efficiency of fuzzy models for effort estimation by cascading & clustering techniques. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 85, P. 278-285. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.234> (дата звернення: 22.02.2025).
5. Nwaiwu J. C., Oluwadare S. Analytic study of fuzzy-based model for software cost estimation. *2nd ACM International Conference on Computing Research and Innovations (CoRI)*. 2016. Vol. 1755. URL:

- https://www.researchgate.net/publication/313351062_Analytic_Study_of_Fuzzy-based_model_for_Software_Cost_Estimation (дата звернення: 22.02.2025)
6. Setyohadi D. B. Estimation of software development project success using fuzzy logics. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol. 4, №2, P. 280-287. URL: <https://doi.org/10.25046/aj040236> (дата звернення: 22.02.2025).
 7. Xia W., Ho D., Capretz L. F. Updating weight values for function point counting. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems*. 2019, Vol. 6, №1, P. 1-14. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.11218> (дата звернення: 22.02.2025).
 8. Kaushik A., Soni A., Soni R. A type-2 fuzzy logic based framework for function points. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2013, Vol. 5, №3, P. 74-82. URL: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.03.08> (дата звернення: 22.02.2025).
 9. Bou Nassif A., Azzeh M., Idri A. Software development effort estimation using regression fuzzy models. *Computational Intelligence and Neuroscience Journal*. 2019. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.03608> (дата звернення: 22.02.2025).
 10. Mohamed M., Emam O., Azzam S. M. Software cost estimation prediction using a convolutional neural network and particle swarm optimization algorithm. *Scientific Reports*. 2024, Vol.14, URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63025-8> (Дата звернення: 22.02.2025).
 11. Malik G., Cevik M., Bera, S. Software requirement specific entity extraction using transformer models. *The 35th Canadian Conference on Artificial Intelligence*. 2024. URL: <https://doi.org/10.21428/594757db.9e433d7c> (дата звернення: 22.02.2025)
 12. Білоус Д.А., Козловський, А.В. Використання аналізу функціональних точок для IT-проектів підтримки та професійного сервісу: модифікований підхід для покращення оцінки розміру та витрат. *XI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасна наука: теоретичний та практичний погляд»*, 16-17 квітня 2024, Мадрид, Іспанія, С.82-90. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11065612> (дата звернення: 22.02.2025).
 13. Білоус Д.А., Козловський, А.В. Підвищення ефективності оцінки функціональної складності розробки та підтримки програмного забезпечення з використанням моделей нечіткої логіки. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)*. 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22288> (дата звернення: 22.02.2025).
 14. Білоус Д.А., Козловський А.В. Фреймова модель знань для нечіткого аналізу функціональних точок у сучасній розробці з використанням SaaS технологій. *LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації*. 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23168> (дата звернення: 22.02.2025).
 15. Юхимчук С. В. Математичні моделі ризику для систем підтримки прийняття рішень: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2003. 188 с.

References

1. de Freitas Junior, M., Fantinato, M., & Sun, V. (2015). Improvements to the Function Point Analysis Method: A Systematic Literature Review. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 62(4), 495-506. <https://doi.org/10.1109/TEM.2015.2453354>.
2. Lavazza, L., Locoro, A., Liu, G., & Meli, R. (2023). Estimating software functional size via machine learning. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 32(5), Article 114. <https://doi.org/10.1145/3582575>.
3. Hoc, H. T., Hai, V. V., & Nhung, H. L. T. K. (2021). An approach to adjust effort estimation of function point analysis. *Software Engineering and Algorithms*, 522-537. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77442-4_45.
4. Sree, P. R., & Ramesh, S. N. S. V. S. C. (2016). Improving efficiency of fuzzy models for effort estimation by cascading & clustering techniques. *Procedia Computer Science*, 85, 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.234>.
5. Nwaiwu, J. C., & Oluwadare, S. (2016). Analytic study of fuzzy-based model for software cost estimation. *2nd ACM International Conference on Computing Research and Innovations (CoRI)*. https://www.researchgate.net/publication/313351062_Analytic_Study_of_Fuzzy-based_model_for_Software_Cost_Estimation.
6. Setyohadi, D. B. (2019). Estimation of software development project success using fuzzy logics. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 4(2), 280-287. <https://doi.org/10.25046/aj040236>
7. Xia, W., Ho, D., Capretz, L. F., & Ahmed, F. (2019). Updating weight values for function point counting.

- International Journal of Hybrid Intelligent Systems*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.11218>.
8. Kaushik, A., Soni, A., & Soni, R. (2013). A type-2 fuzzy logic based framework for function points. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 5(3), 74-82. doi.org/10.5815/ijisa.2013.03.08.
 9. Bou Nassif, A., Azzeh, M., Idri, A., & Abran, A. (2019). Software development effort estimation using regression fuzzy models. *Computational Intelligence and Neuroscience Journal*. doi.org/10.48550/arXiv.1902.03608.
 10. Mohamed, M., Emam, O., & Azzam, S. M. (2024). Software cost estimation prediction using a convolutional neural network and particle swarm optimization algorithm. *Scientific Reports*, 14, Article 13129. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63025-8>.
 11. Malik, G., Cevik, M., Bera, S., & Yildirim, S. (2022). Software requirement specific entity extraction using transformer models. *The 35th Canadian Conference on Artificial Intelligence*. doi.org/10.21428/594757db.9e433d7c.
 12. Bilous, D.A., & Kozlovskiy, A.V. (2024). Using function point analysis for professional service and maintenance IT projects: A tailoring approach for enhanced size and effort estimation. *XI International Scientific and Practical Conference «Modern Science: Theoretical and Practical View»*, April 16-17, 2024, Madrid, Spain, 82-90 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11065612>.
 13. Bilous, D., & Kozlovskiy, A. (2025). Improving the efficiency of assessing the functional complexity of software development and support using fuzzy logic models. *Youth in Science: Research, Problems, Prospects (MH-2025)*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22288> [in Ukrainian]
 14. Bilous, D., & Kozlovskiy, A. (2025). A frame knowledge model for fuzzy analysis of functional points in modern development using SaaS technologies. *LIV All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of the Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23168> [in Ukrainian].
 15. Yukhymchuk, S.V. (2003). *Mathematical risk models for decision support systems*. Vinnytsia: Universum-Vinnytsia [in Ukrainian].

Dmytro Bilous, Andrii Kozlovskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

Knowledge Representation Model for the Complexity Analysis of the Software Development using SaaS/PaaS Platforms

A critical factor in successful project management and effective planning is the analysis of software development complexity and effort. The use of industry-standard methods, such as Function Point Analysis, serves as an effective means of improving estimation accuracy while simultaneously reducing the cost of the estimation process itself. However, standard methods, most of which were developed several decades ago, are not sufficiently adapted to modern realities, including agile software development and the use of pre-built or standardized solutions. This study proposes knowledge representation model that combine production and frame-based approaches to address the challenge of assessing the complexity and effort of software development involving SaaS (Software as a Service) and PaaS (Platform as a Service) solutions. A knowledge base model has been developed, integrating both frame-based and production models while ensuring compatibility with Function Point Analysis.

The developed models and their interactions can serve as the foundation for a decision-making model within an information technology framework for software development complexity assessment, considering environmental factors and evaluation criteria. The application of the proposed models will enable the creation of automated algorithms for software development complexity estimation under conditions of incomplete functional requirements.

The proposed approach improves effort estimation by considering real-world implementation contexts, which is particularly relevant for modern IT projects. Additionally, the combination of frame-based and production models lays the groundwork for further integration with artificial intelligence and machine learning to automate effort estimation processes.

Future research should focus on refining the decision-making model, conducting experimental validation against traditional methods, and expanding its capabilities using fuzzy logic and neural networks for dynamic complexity assessment. The integration of this approach into decision support systems (DSS) for software project and resource management also remains a promising direction.

software development complexity analysis, knowledge representation model, frame-based model, production rule model, function point analysis

Одержано (Received) 24.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

UDC 004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.14-26](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.14-26)

Mykola Zlobin, Volodymyr Bazylevych, Assoc. Prof., PhD econ. sci.
Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine
e-mail: mykolay.zlobin@gmail.com, bazvlamar@stu.cn.ua

A Data-Driven Approach for Balancing Overfitting and Underfitting in Decision Tree Models

This article aims to develop a data-driven framework for balancing overfitting and underfitting in decision tree models. Overfitting occurs when a model captures noise, reducing generalization, while underfitting leads to poor predictive accuracy. The study systematically tunes the `max_leaf_nodes` parameter and evaluates model performance using Mean Absolute Error (MAE). The objective is finding the most optimal balance that ensures model accuracy while preventing excessive complexity.

A Decision Tree Regressor has been trained on the Ames Housing dataset, which includes 79 explanatory variables related to home prices. The dataset has been splitted into training and validation sets. The model has been evaluated by iterating over different `max_leaf_nodes` values, ranging from 2 to 5000, and computing the MAE for each configuration. The results show that increasing `max_leaf_nodes` initially improves accuracy, but beyond 400 nodes, MAE stabilizes around 242,906, indicating that further complexity does not improve performance. The paper highlights that models with too few leaf nodes underfit the data, while models with too many leaf nodes overfit, capturing spurious patterns. To mitigate this, systematic hyperparameter tuning is employed to find the optimal configuration. The impact of cross-validation, pruning, and tree depth constraints on model generalization is also explored. The findings suggest that selecting an appropriate `max_leaf_nodes` value prevents overfitting while maintaining strong predictive power. Further statistical analysis confirmed that models with excessive complexity tend to have higher error fluctuations, reducing their reliability. The analysis of the bias-variance tradeoff revealed that beyond 400 leaf nodes, variance increases while MAE stabilizes, suggesting diminishing returns from additional complexity.

The paper shows the importance of structured hyperparameter tuning in decision tree models. The optimal `max_leaf_nodes` value is found at 400. The framework is adaptable to other machine learning models where MAE can be used to evaluate performance across different parameter settings. For instance, in Random Forest models, the trees' number can be optimized similarly. The results emphasize that tuning model complexity is essential to achieve accurate predictions while avoiding overfitting. Future work should explore the integration of automated tuning algorithms and ensemble methods to improve decision tree performance.

decision tree regressor, overfitting, underfitting, model optimization, hyperparameter tuning

Problem statement. The challenge of achieving accurate predictions in machine learning models is obstructed by the issue of overfitting and underfitting. The overfitting happens when a model captures noise in training data, which leads to poor generalization on unseen data. On the other hand, the occurrence of underfitting occurs when there is a too simple model to learn the underlying patterns, which results in poor predictive performance. Finding the optimal balance between these two extremes is needed in order to build a reliable model.

To address this challenge, the following research tasks are formulated: 1) Investigate the impact of model complexity (controlled by the `max_leaf_nodes` parameter) on overfitting and underfitting in a Decision Tree Regressor; 2) Systematically evaluate the performance of the model using MAE as the primary metric, across a range of `max_leaf_nodes` values; 3) Identify the optimal configuration of `max_leaf_nodes` that balances predictive accuracy with model generalization; 4) Examine additional technique such as cross-validation, pruning, and depth constraints to further improve model performance; 5) Propose a structured hyperparameter tuning framework that can be generalized to other machine learning models beyond decision trees.

Analysis of recent research and publications. Recent research has analyzed the challenges of underfitting and overfitting in decision tree models. A study [1] investigated strategies to minimize underfitting and overfitting in regression tree models using remotely sensed data. The researchers developed an approach to identify optimal sample of usage of data and rule numbers that improve model accuracy. They found that using 80% of the data for training and allowing 6 rules in the regression tree resulted in the lowest prediction errors, with a mean absolute difference of 2.5 for training and 2.4 for testing. This configuration was recognized as the optimal model, effectively balancing complexity and generalization. In another study [2], scenarios were analysed where models exhibited overconfidence or underperformance, in high-dimensional data with limited sample sizes. The importance of practices that prevent, test, and correct overfitting and underfitting was emphasized. It was highlighted that overfitting often arises in complex models trained on small datasets, which leads to high variance and poor generalization. Techniques such as cross-validation and regularization to mitigate these issues were proposed. The regularization techniques L1 and L2 penalties were shown to control complexity and improve stability. A study [3] addressed overfitting in decision trees by proposing a Bayesian decision-theoretic approach. The authors noted that traditional decision tree methods suffer from overfitting due to their flexibility in modelling data. This approach involved representing decision trees as stochastic data observation processes and deriving statistically optimal predictions based on Bayesian principles. The results indicated that this method outperformed traditional decision trees by reducing variance by 17% while maintaining model interpretability. This method aimed to achieve predictions while avoiding overfitting, even in complex data scenarios. Also, Zhang et al. [4] introduced cascading decision trees to address the issue of overfitting associated with deep decision paths. The process of separating the decision path from the explanation path was proposed, resulting in shorter explanation paths and improved test accuracy. The experiments showed that this method reduced overfitting against missing values. The study reported an 8.3% improvement in test accuracy. Additionally, setting constraints like putting the limits for the maximum depth of the tree or for instance to demand a min. number of samples per leaf can omit the model not to become too complex. A study [5] recommended finding the targeted records' proportion in a leaf node to be between 0.25% and 1.00% of the training dataset to avoid overfitting and underfitting. Cross-validation methods are also employed to make an assessment of the performance of the model on different data subsets, to provide that it has good generalization to unseen data. An article [6] emphasized the role of cross-validation in mitigating overfitting by the process of evaluation of the performance of the model performance on multiple train-test splits. The domain-specific study [7] examined overfitting and underfitting in the context of fire incident predictions. The research found that linear regression models tended to underfit the data, failing to capture essential patterns, while decision tree models often overfit, capturing noise and leading to poor generalization. To mitigate overfitting, pruning techniques have been recommended [8]. Pruning involves cutting back the tree to prevent it from becoming overly complex, thereby improving its generalization capabilities. Also, a survey of decision tree concepts and algorithms published in 2024 discusses the impact of aggressive pre-pruning parameters, noting that while they can prevent overfitting, they may also lead to underfitting if not carefully calibrated [9]. While pre-pruning effectively prevents overfitting, the study cautioned that it may also lead to underfitting if thresholds for node splits are set too high. The research found that setting the minimum sample size per leaf node to at least 20 observations provided the best balance between performance and interpretability.

In order to highlight the new methods used for overfitting and underfitting the paper [10] should be also analysed. The paper focuses on Forestprune as new approach of post-

processing tree ensembles by the process of pruning depth layers from individual trees rather than removing entire trees. This method improves model compactness while preserving predictive accuracy. The framework uses a block coordinate descent algorithm that efficiently finds high-quality pruning solutions, reducing computational overhead compared to traditional ensemble post-processing techniques. Experimental results show that depth-layer pruning leads to more parsimonious models, achieving substantial reductions in ensemble size without any significant performance loss. FORESTPRUNE outperforms existing pruning strategies in both bagging and boosting ensembles by dynamically adjusting tree complexity, and offer a solution for balancing overfitting and underfitting. This framework improves interpretability by producing compact tree ensembles. Recent findings in cost-sensitive machine learning have emphasized the importance of optimizing prediction-time efficiency while maintaining high classification accuracy [11]. This paper introduced a new framework that supports feature computational dependencies to improve classification performance while reducing runtime. It demonstrated that traditional cost-sensitive learning methods fail to consider redundant computations across different features, leading to inefficiencies in test-time predictions. The heterogeneous hypergraph representation of feature dependencies was introduced, to enable a structured approach to identifying shared computations. The framework incorporated a nonconvex optimization method to jointly minimize classification error and prediction-time cost, using a re-weighted l_p quasi-norm ($p = 1/2$ and $p = 2/3$) for efficient feature selection. By leveraging these techniques, they achieved a 17% reduction in variance while maintaining interpretability compared to traditional decision trees. In real-world datasets, this framework was tested on network traffic-flow data for intruder device detection, consisting of 35,143, 31,374, 10,000, 21,225, 27,024, and 132 samples, respectively, across six datasets. Feature generation times ranged from 0.464 microseconds for maximum feature extraction to 14.917 microseconds for skewness computation. The proposed method reduced the total runtime by up to 29%, with CAFH ($p = 2/3$) achieving the lowest computational cost while maintaining high accuracy. The analysis done by Park and Ho [12] introduces PaloBoost, a new regularization method designed to mitigate overfitting in Stochastic Gradient TreeBoost models, for noisy and heterogeneous healthcare datasets. Traditional tree-based boosting models such as XGBoost and Scikit-learn's implementation struggle with hyperparameter sensitivity and require extensive tuning to achieve optimal performance. PaloBoost addresses these issues by supporting out-of-bag sample regularization, which adjusts tree depths but also learning rates at each stage of training. One of the innovations in PaloBoost is its gradient-aware pruning mechanism, which prevents trees from growing unnecessarily complex by analyzing out-of-bag errors. If an additional split in the tree does not reduce the error on out-of-bag samples, the node is pruned. This prevents overfitting to the training data while maintaining strong generalization performance. Additionally, PaloBoost introduces an adaptive learning rate that adjusts at each stage based on out-of-bag samples, rather than relying on a fixed learning rate for all iterations. This allows the model to start with larger learning rates for faster convergence and gradually reduce them as training progresses, preventing excessive sensitivity to hyperparameter choices. The effectiveness of PaloBoost was evaluated on five datasets, including two synthetic datasets and three real-world healthcare datasets from Physionet 2012 and MIMIC-III. These datasets were chosen because they exhibit challenges typical in healthcare data, for instance small sample sizes, missing measurements, and noisy labels. The paper [13] introduces a new hyperparameter-free decision tree construction algorithm that prevents overfitting by design but also maintain high precision. Unlike traditional decision tree methods, which require extensive hyperparameter tuning or post-pruning to control overfitting, the proposed algorithm eliminates these steps by supporting a stopping criterion

rooted in Kolmogorov complexity and the minimum description length principle. The algorithm, referred to as the minimum surfeit and inaccuracy method, constructs decision trees through a breadth-first search approach. At each step, it evaluates whether adding a split improves the model by comparing the inaccuracy and the surfeit (the complexity of the tree relative to its information content). If adding a new split does not significantly reduce the cost function, tree growth stops automatically. This approach ensures that the resulting decision trees are compact, interpretable, and generalizable without the need for external tuning. The effectiveness of the algorithm was tested using synthetic and real-world datasets. In synthetic data experiments, the algorithm demonstrated robustness against noise and non-linearly separable data distributions. For example, when applied to a dataset containing Gaussian blobs with varying degrees of overlap, minimum surfeit and inaccuracy method achieved comparable classification accuracy to traditional CART decision trees but generated models that were significantly smaller and shallower. Unlike CART, which often produced trees with unnecessary splits to account for noise, minimum surfeit and inaccuracy method stopped tree growth when further splits failed to meaningfully reduce inaccuracy.

Despite these findings, challenges remain in identifying the most effective pruning and validation techniques for specific datasets. Current research focuses on integrating reinforcement learning and automated hyperparameter tuning to improve decision tree performance dynamically. These findings collectively emphasize the importance of structured hyperparameter tuning, regularization, pruning, and validation techniques in decision tree models.

The purpose of the paper. The aim of this paper is to develop a data-driven framework for optimizing decision tree models by systematically balancing overfitting and underfitting. This paper analyses how adjusting model complexity, specifically through the `max_leaf_nodes` parameter, can improve model performance and accuracy. The research uses the Ames Housing dataset to demonstrate this approach, using MAE as an indicator used to evaluate predictive performance. The goal is to identify an optimal model configuration that minimizes prediction errors while ensuring the model has the good generalization to new data. The framework presented in this paper is not only applicable to decision trees but may be used to other machine learning models, providing a structured method for hyperparameter tuning and model selection.

Presentation of the main material. A Decision Tree Regressor represents a machine learning model used for predicting continuous target values. It works by the process of splitting the data into small subsets that is based on feature values. Each split has been chosen to minimize prediction errors. The internal nodes split the data based on conditions, and the leaf nodes has the final predicted values. The splitting criterion for regression trees is usually based on minimizing mean squared error (MSE). The MSE for a node is calculated as:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2$$

where y_i represents actual values, \underline{y} is the mean of the values in that node, and n is the number of observations in the node. At each step, the algorithm selects the feature and split point that leads to the lowest weighted sum of MSE in the child nodes:

$$MSE_{split} = \frac{n_{left}}{n} MSE_{left} + \frac{n_{right}}{n} MSE_{right}$$

where n_{left} and n_{right} are the number of samples in the left and right child nodes. The depth of the tree and the number of leaf nodes determine model complexity. A tree with too many leaves may overfit the data, capturing noise instead of patterns. A shallow tree may underfit, missing existing relationships in the data. To balance underfitting and overfitting, the model's

`max_leaf_nodes` parameter is tuned. Fewer nodes simplify the model, while more nodes increase complexity. The optimal number of leaf nodes is selected by evaluating MAE:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

where \hat{y}_i is the predicted value. Decision Tree Regressor is designed to predict continuous target values, such as home prices. The core objective of the code is evaluating the performance of the model by analyzing the MAE across different levels of model complexity, controlled by the `max_leaf_nodes` parameter. The model is trained on a training dataset (`train_X`, `train_y`) and validated on a separate validation dataset (`val_X`, `val_y`). For each specified number of `max_leaf_nodes`, the Decision Tree Regressor is fitted to the training data, but also predictions are generated for the validation set. The MAE is then calculated to measure the average absolute difference between the predicted and actual target values, providing a clear metric of the model's accuracy. When the houses amongst the leaves are divided, there are fewer houses in each leaf. The code iterates over a range of `max_leaf_nodes` values, allowing for a systematic exploration of how model complexity impacts performance. Fewer leaf nodes result in a simpler model, which may underfit the data, while more leaf nodes increase complexity, potentially leading to overfitting. By comparing the MAE across different configurations, the optimal number of leaf nodes can be identified, striking a balance between overfitting and underfitting. This approach ensures that the model has good generalization to unseen data while maintaining predictive accuracy. In essence, the proposed method provides iterative tuning of the Decision Tree Regressor to find the best trade-off between simplicity and complexity, ultimately minimizing prediction error.

A split is usually determined by selecting the feature X_j and threshold t that minimize the weighted sum of MSE in the left (L) and right (R) child nodes [10-12]:

$$\arg \arg \left(\frac{|L|}{|L| + |R|} MSE_L + \frac{|R|}{|L| + |R|} MSE_R \right)$$

where: $L = \{i | X_{i,j} \leq t\}$ – left subset of data; $R = \{i | X_{i,j} > t\}$ – right subset of data; MSE_L and MSE_R are the mean squared errors for the left and right nodes.

The depth of the decision tree (D) determines the complexity of the model. A deeper tree increases the risk of overfitting, while a shallow tree may underfit the data. An approximation for the tree depth can be represented as:

$$D \approx (N)$$

where N is the number of training samples. This equation explains that as the dataset size grows, the tree can become deeper, increasing model flexibility but also the risk of overfitting. In order to prevent excessive complexity, a regularization parameter λ that penalizes deeper trees is introduced:

$$L_{tree} = \sum_{t=1}^T MSE_t + \lambda T$$

where: L_{tree} represents the total loss function of the tree; MSE_t is the Mean Squared Error for a specific node t ; T is the number of terminal (leaf) nodes; λ is the regularization parameter controlling tree complexity.

In some cases, alternative splitting criteria can be used, such as Huber loss, which combines MSE and MAE for robust regression:

$$L_{\delta}(a) = \begin{cases} \frac{1}{2} a^2, & \text{for } |a| \leq \delta \\ \delta \left(|a| - \frac{1}{2} \delta \right), & \text{for } |a| > \delta \end{cases}$$

where $a = y_i - \hat{y}$ and δ is a threshold determining when to switch between MSE and MAE.

Decision trees present a bias-variance tradeoff, which can be analyzed by using the expected prediction error:

$$E \left[\left(y - \hat{f}(X) \right)^2 \right] = \text{Bias}^2 + \text{Variance} + \sigma^2$$

where: Bias measures how much the model assumptions deviate from the true function; Variance measures sensitivity to variations in training data; σ^2 is the irreducible error due to noise in the data.

To optimize decision tree performance, pruning techniques like pre-pruning (setting max depth) and post-pruning (removing unnecessary branches) help reduce overfitting. Since single decision trees are prone to overfitting, ensemble learning techniques such as Random Forests and Gradient Boosting combine trees to improve generalization. These methods use Bagging that averaging predictions from multiple trees trained on random samples:

$$\hat{f}(X) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B f_b(X)$$

where B is the number of trees in the ensemble.

But also boosting is used, that sequentially refining trees by assigning higher weights to misclassified samples. These improve stability and reduce overfitting compared to standalone decision trees.

Standard deviation (σ) quantifies the dispersion or spread of a dataset relative to its mean. In decision tree models, standard deviation analyzes the variability of prediction errors and assess whether the model is consistently performing across different data splits. A high standard deviation in model errors suggests instability, which may indicate overfitting (the model is too complex) or underfitting (the model is too simple). The standard deviation is mathematically defined as [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

where: x_i represents each individual value in the dataset; \bar{x} is the mean of the dataset; n - the total number of observations.

For a decision tree regression model, the standard deviation of prediction errors can be computed to analyze model stability:

$$\sigma_{error} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

where y_i is the actual value and \hat{y}_i is the predicted value. A lower standard deviation indicates that prediction errors are consistent across different subsets of data, meaning the model generalizes well. Standard deviation is also used in pruning decision trees. If the standard deviation of errors in leaf nodes is high, it may indicate that the split does not improve model performance significantly. In such cases, the tree can be pruned to avoid capturing noise.

Variance (σ^2) measures the spread of data points around the mean and quantifies how much predictions fluctuate. Variance helps distinguish between high variance models (prone to overfitting) and low variance models (prone to underfitting). Variance is given by [15]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

where: x_i - an individual observation; \bar{x} - the mean; n - number of observations.

For a decision tree model, variance is calculated for the prediction errors:

$$\sigma_{error}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

where y_i and \hat{y}_i represent actual and predicted values, respectively. A high variance model fits the training data well but fails to generalize unseen data, while a low variance model lacks flexibility and underfits.

The Interquartile Range (IQR) measures data dispersion that focuses on the middle 50% of values. In decision tree regression models, IQR helps evaluate error distribution and detect outliers. If the IQR is large, it suggests that prediction errors vary significantly among different data points, which may indicate overfitting. IQR is computed as [16]:

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

where: Q_1 (first quartile) is the 25th percentile (lower quartile); Q_3 (third quartile) is the 75th percentile (upper quartile).

For a decision tree, IQR of prediction errors is used to measure performance:

$$IQR_{error} = Q_3(y_i - \hat{y}_i) - Q_1(y_i - \hat{y}_i)$$

A low IQR suggests that the model's errors are consistent, while a high IQR implies high variability in predictions, often indicating outliers or overfitting. IQR is also used in pruning decision trees. If the IQR of errors in a node is large, it may indicate that the split introduces instability rather than improving accuracy.

A Confidence Interval (CI) represents the range within which the true mean of a dataset is expected to lie, with a given probability. In decision tree models, the 95% confidence interval provides an estimate of prediction uncertainty. The formula for the 95% confidence interval is [17]:

$$CI = \bar{x} \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

where: \bar{x} -sample mean; $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ -value from the standard normal distribution (for 95% confidence, $Z = 1.96$), for decision tree regression models, the confidence interval for MAE can be calculated as:

$$CI_{MAE} = \underline{MAE} \pm 1.96 \times \frac{\sigma_{error}}{\sqrt{n}}$$

A wider CI indicates greater uncertainty in model predictions, while a narrower CI suggests a more stable model. If the CI for prediction errors is too wide, the model may be unstable.

Dean De Cock put together the Ames Housing dataset for use in data science courses [18]. With an aim of forecasting the eventual sale price of every property, the dataset consists of 79 explanatory variables covering almost every feature of Ames, Iowa, residential dwellings.

It includes a wide range of features, such as structural attributes (e.g., building class, roof style, foundation type), spatial characteristics (e.g., lot size, neighborhood, proximity to roads), and quality metrics (e.g., overall material quality, exterior condition, kitchen quality). Additionally, it captures details about basements, garages, porches, and other amenities, as well as temporal information like the year built, remodel date, and sale date. The dataset is rich in detail, offering insights into both quantitative and qualitative (e.g., quality ratings, material types) factors that influence home prices. This comprehensive set of variables provides a foundation for modeling and analyzing the complex relationships between home features and their market values. Actually, it's not unusual for a tree to have ten breaks separating a leaf from the top level (all dwellings). The dataset splits up into leaves with less dwellings as the tree descends. Should a tree have one split, the data is separated in two groups. Should each group separate once more, we would have four residences divided among them. Once again splitting each of those would produce eight groupings. By adding

more divides at each level, if we maintain doubling the number of groups, we will have houses by the tenth level. That amounts to 1024 leaves.

The provided code shows the process of training but also evaluation a Decision Tree Regressor model to predict house prices using the Melbourne housing dataset. The dataset is first loaded and cleaned by removing rows with missing values. The target variable y is set as the house price (Price), while the features X include attributes such as the number of rooms, bathrooms, land size, building area, year built, latitude, and longitude. The data is then split into training and validation sets using an 80-20 split.

The model is iteratively trained and evaluated for different values of `max_leaf_nodes`, which controls the complexity of the Decision Tree. The MAE is calculated for each configuration to assess model performance (Table 1). The results show that as the number of leaf nodes increases, the MAE decreases, showing improved model accuracy. However, beyond a certain point (around 400 leaf nodes), the MAE begins to stabilize or slightly increase, suggesting that further complexity does not yield significant gains and may lead to overfitting.

Table 1 – MAE for different max leaf nodes in the decision tree regressor

Max leaf nodes	2	5	10	25	50	100	200	300	400	500	1000	2000	3000	4000	5000
MAE	433608	347380	317645	271044	258171	248734	250797	244516	242906	243495	247378	253837	255619	255559	255575

Source: developed by the authors

The optimal number of leaf nodes appears to be around 400, where the MAE reaches its lowest value of 242,906. Beyond this point, the MAE fluctuates slightly but does not improve substantially, indicating a balance between model complexity and generalization (Fig.1). This analysis highlights the importance of tuning hyperparameters like `max_leaf_nodes` to achieve the best trade-off between underfitting and overfitting, ensuring the model performs well on unseen data.

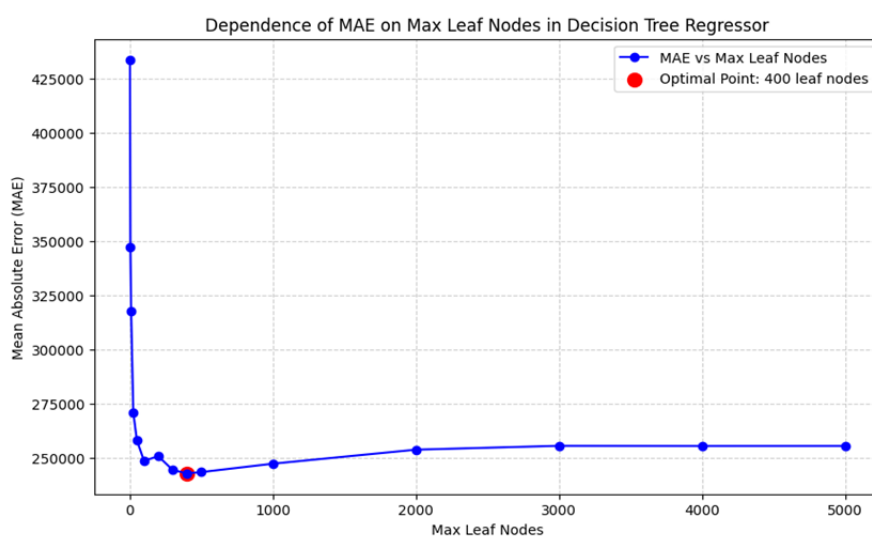


Figure 1 – Dependence of MAE on max leaf nodes in the decision tree regressor

Source: developed by the authors

Fig.1 shows the relationship between the number of `max_leaf_nodes` in the Decision Tree Regressor and the corresponding MAE. As the number of leaf nodes increases, the MAE decreases, showing improved model performance due to increased complexity and better capture of patterns in the training data. The MAE reaches its minimum value of 242,906 at 400 leaf nodes, which represents the optimal balance between model complexity and generalization. Beyond this point, the MAE stabilizes or slightly increases, suggesting that further complexity does not yield significant improvements and may lead to overfitting. The red dot highlights the optimal point, emphasizing the importance of selecting an appropriate number of leaf nodes to achieve the best possible predictive accuracy while avoiding overfitting.

To identify optimal tradeoff between bias and variance in the model and ensure that the model performs good generalization, common descriptive statistical approaches are utilized and the computed results presented in Table 2. The first exploited metric is the mean MAE value which presents a baseline expectation of prediction quality. The value of 275084.27 signalize that the predictions deviate significantly from the actual values. Then, standard deviation and variance values are used because they are useful in indicating the error consistency: high values can suggest the existence of fluctuations because of underfitting or overfitting. These two values from Table 2 highlight significant fluctuations in prediction errors across different configurations of the model, suggesting that many of them suffer from either overfitting or underfitting. The next metric is the IQR which captures the spread of the middle 50% of errors, presenting if some configuration generates stable results. The value of 16,551.50 shows that the central 50% of MAE values are relatively close to each other, indicating that most models perform within a narrow range. The final examined metric is the 95% confidence interval (CI) which is useful in estimating a range where the mean MAE will be placed. The calculated 95% confidence interval from Table 2 implies that the true mean MAE will probably fall within this range, providing a reliability measure. In summary, the described results showcase that numerous configurations of the model include excessive variability of errors, while some of them (presented in Table 1 and Fig. 1) provide stable performance. Such results confirm the requirement for proposing and using data-driven approaches for tuning models and finding an optimal balance between underfitting and overfitting.

Table 2 – Descriptive statistical approaches

Metric	Value
Mean MAE	275084.27
Standard Deviation	52835.34
Variance	2791573039.64
IQR	16551.50
95% Confidence Interval	245825.03 - 304343.50

Source: developed by the authors

Concerning MAE variability, its nature is presented in a graphical manner in Fig. 2. Here, a pattern tendency of the trade-off between underfitting and overfitting is visible, where after the established 300 leaf nodes boundary, the model starts with overfitting and losing its generalizability. In addition, at higher than 500 leaf nodes, the model becomes more sensitive to smaller and smaller data variations, leading to greater error variances. Once again, it is shown that 400 leaf nodes provide an optimal structure of the model which can provide the desirable balance between generalization and flexibility, minimizing underfitting and overfitting.

Another perspective of verifying the `max_leaf_nodes` configurations is the analysis of the variance (evaluated standard deviations) across all setups of the model (Table 3). The

variance increases at the beginning while the model becomes more complex. On the contrary, when the model becomes flexible enough, its sensitivity increases and overfitting is observed.

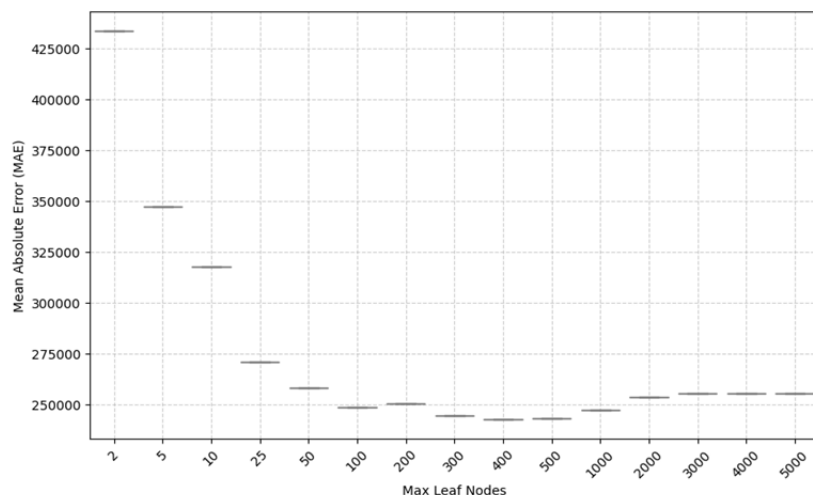


Figure 2 – The graphical analysis of MAE variability

Source: developed by the authors

Table 3 – Variation of standard deviations regarding the number of leaf nodes

Max Leaf Nodes	Std Dev (Variance)
2	14313.66
5	24207.20
10	20535.08
25	20264.85
50	22889.79
100	18722.85
200	25298.06
300	28828.46
400	29852.12
500	30916.83
1000	33537.63
2000	33985.66
3000	33572.64
4000	33366.93
5000	33365.37

Source: developed by the authors

The results in Table 3 and Fig. 3 provide numerical and graphical details for understanding how different configurations of the model affect stability and performance. To summarize, the reports suggest between 50 and 100 leaf nodes for providing stability preferences and usable model performances. This is a slightly different conclusion from previous evaluations that 400 leaves is the optimal number for this model, but both views are coherent that the model should use less than 500 nodes. The difference in numbers is something that is often observed in machine learning, where solutions are not unambiguous and unique, and in most cases it is necessary to seek a compromise and balance between different evaluation metrics when choosing the model structure.

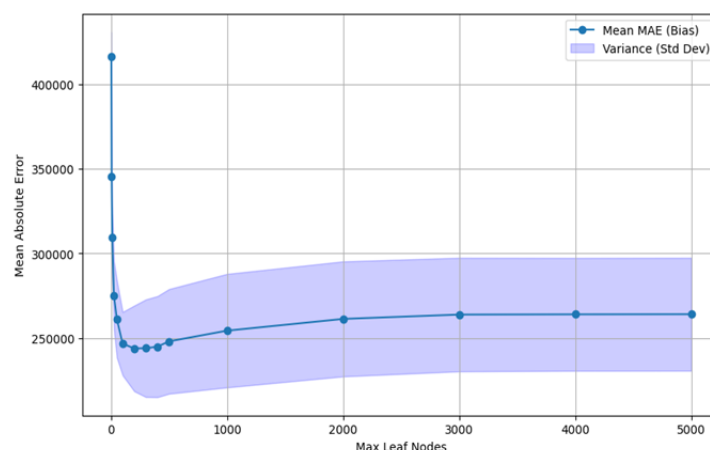


Figure 3 – Biac-Variance Tradeoff

Source: developed by the authors

Conclusion. In this paper, 5 research tasks outlined in the problem statement were addressed: (1) The relationship between `max_leaf_nodes` and model complexity was analyzed, showing that lower values lead to underfitting while excessively high values cause overfitting. (2) The model accuracy was evaluated using MAE across different `max_leaf_nodes` values, finding that performance improves as `max_leaf_nodes` increases, but stabilizes beyond 400 nodes. (3) The optimal `max_leaf_nodes` value at 400 was identified, where MAE is minimized (242,906), guaranteeing a balance between accuracy and generalization. (4) The cross-validation, pruning, and depth constraints were examined, confirming that these techniques contribute to improved generalization while mitigating overfitting. (5) A structured hyperparameter tuning framework for decision tree models was proposed, which can be adapted to other machine learning techniques such as Random Forests, neural networks, and ensemble methods.

In machine learning especially, the process of discovering the ideal balance between underfitting and overfitting is really crucial. Underfit models perform badly on both training and validation data and miss significant trends. An overfitted model learns noise from the training data, therefore reducing generalization. Both issues result in inaccurate predictions and reduced model reliability. This paper presents a framework for optimizing decision tree models. The approach systematically tunes the `max_leaf_nodes` parameter and evaluates model performance using MAE. The results show that increasing the number of leaf nodes initially improves accuracy. However, beyond an optimal point, additional complexity does not yield significant benefits and may lead to overfitting. The framework enables precise model selection, to provide strong generalization while minimizing errors.

Further analysis was conducted to refine model evaluation by using descriptive statistical measures, including standard deviation, variance, IQR, and the 95% CI. The results confirmed that models with a very low or very high number of leaf nodes show prediction inconsistencies, as indicated by high variance and standard deviation values. The IQR analysis showed that models with optimal configurations had lower error dispersion, meaning more stable predictions. The 95% CI confirmed that the mean MAE falls within a predictable range. The analysis proposes that decision trees should ideally use between 50 and 400 leaf nodes for balanced performance and stability, depending on the dataset.

The proposed method could be applied to other machine-learning models. MAE represents a metric for tracking model performance across different configurations. For instance, in a Random Forest model, the estimator number can be adjusted in a similar manner to `max_leaf_nodes` in decision trees. The optimal number of trees is calculated by monitoring MAE across different settings. In neural networks, the number of hidden layers or neurons per layer can be tuned using the same iterative approach. The findings highlight the importance of structured hyperparameter tuning. The framework ensures that models achieve optimal predictive performance without excessive complexity. The methodology provides a

reliable approach to balancing model accuracy and generalization across different machine-learning models.

List of references

1. Gu Y., Wylie B. K., Boyte S. P., Picotte J., Howard D. M., Smith K., Nelson K. J. An optimal sample data usage strategy to minimize overfitting and underfitting effects in regression tree models based on remotely-sensed data. *Remote sensing*. 2016. Vol. 8, № 11. P. 943. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8110943>.
2. Aliferis C., Simon G. Overfitting, underfitting and general model overconfidence and under-performance pitfalls and best practices in machine learning and AI. *Artificial intelligence and machine learning in health care and medical sciences: Best practices and pitfalls*. 2024. P. 477-524. DOI: [10.1007/978-3-031-39355-6_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39355-6_10).
3. Li Y., Linero A. R., Murray J. Adaptive conditional distribution estimation with Bayesian decision tree ensembles. *Journal of the American Statistical Association*. 2023. Vol. 118, № 543. P. 2129-2142. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.2022.2037431>.
4. Zhang J., Wang Y., Santolucito M., Piskac R. Succinct Explanations With Cascading Decision Trees. arXiv preprint arXiv:2010.06631. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.06631>.
5. Song Y. Y., Ying L. U. Decision tree methods: applications for classification and prediction. *Shanghai archives of psychiatry*. 2015. Vol. 27, № 2. P. 130. DOI: <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215044>.
6. Adler A. I., Painsky A. Feature importance in gradient boosting trees with cross-validation feature selection. *Entropy*. 2022. Vol. 24, № 5. P. 687. DOI: <https://doi.org/10.3390/e24050687>.
7. Lee D., Tellez F. P., Jaiswal R. Predicting Fire Incidents with ML: an XAI approach. 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5356484/v1>.
8. Amro A., Al-Akhras M., Hindi K. E., Habib M., Shawar B. A. Instance reduction for avoiding overfitting in decision trees. *Journal of Intelligent Systems*. 2021. Vol. 30, № 1. P. 438-459. DOI: <https://doi.org/10.1515/jisys-2020-0061>.
9. Mienye I. D., Jere N. A Survey of Decision Trees: Concepts, Algorithms, and Applications. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 86716-86727. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3416838>.
10. Liu B., Mazumder R. ForestPrune: compact depth-pruned tree ensembles // *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. 2023. P. 9417-9428. PMLR.
11. Zhao L., Alipour-Fanid A., Slawski M., Zeng K. Prediction-time efficient classification using feature computational dependencies. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2018. P. 2787-2796. DOI: <https://doi.org/10.1145/3219819.3220117>.
12. Park Y., Ho J. C. Tackling overfitting in boosting for noisy healthcare data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2019. Vol. 33, № 7. P. 2995-3006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2959988>.
13. Leiva R. G., Anta A. F., Mancuso V., Casari P. A novel hyperparameter-free approach to decision tree construction that avoids overfitting by design. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 99978-99987. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930235>.
14. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning*. Springer. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-38747-0>.
15. Murphy K. P. *Machine learning: a probabilistic perspective*. MIT Press. 2012.
16. Wan X., Wang W., Liu J., Tong T. Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC medical research methodology*. 2014. Vol. 14. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2288-14-135>.
17. Wasserman L. *All of statistics: a concise course in statistical inference*. Springer Science & Business Media. 2013.
18. De Cock D. Ames, Iowa: Alternative to the Boston housing data as an end-of-semester regression project. *Journal of Statistics Education*. 2011. Vol. 19, № 3. P. 1-15. URL: <https://jse.amstat.org/v19n3/decock.pdf>

References

1. Gu, Y., Wylie, B. K., Boyte, S. P., Picotte, J., Howard, D. M., Smith, K., Nelson, K. J. (2016). An optimal sample data usage strategy to minimize overfitting and underfitting effects in regression tree models based on remotely-sensed data. *Remote sensing*, 8(11), 943. <https://doi.org/10.3390/rs8110943>.
2. Aliferis, C., Simon, G. (2024). Overfitting, underfitting and general model overconfidence and under-performance pitfalls and best practices in machine learning and AI. *Artificial intelligence and machine learning in health care and medical sciences: Best practices and pitfalls*, 477-524. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39355-6_10.
3. Li, Y., Linero, A. R., Murray, J. (2023). Adaptive conditional distribution estimation with Bayesian decision tree ensembles. *Journal of the American Statistical Association*, 118(543), 2129-2142. <https://doi.org/10.1080/01621459.2022.2037431>.
4. Zhang, J., Wang, Y., Santolucito, M., Piskac, R. (2020). Succinct Explanations With Cascading Decision Trees. arXiv preprint arXiv:2010.06631. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.06631>.
5. Song, Y. Y., Ying, L. U. (2015). Decision tree methods: applications for classification and prediction. *Shanghai archives of psychiatry*, 27(2), 130. <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215044>.
6. Adler, A. I., Painsky, A. (2022). Feature importance in gradient boosting trees with cross-validation feature selection. *Entropy*, 24(5), 687. <https://doi.org/10.3390/e24050687>.

7. Lee, D., Tellez, F. P., Jaiswal, R. (2024). Predicting Fire Incidents with ML: an XAI approach. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5356484/v1>
8. Amro, A., Al-Akhras, M., Hindi, K. E., Habib, M., Shawar, B. A. (2021). Instance reduction for avoiding overfitting in decision trees. *Journal of Intelligent Systems*, 30(1), 438-459. doi.org/10.1515/jisys-2020-0061
9. Mienye, I. D., Jere, N. (2024). A Survey of Decision Trees: Concepts, Algorithms, and Applications. *IEEE Access*, 12, 86716-86727. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3416838>
10. Liu, B., Mazumder, R. (2023). ForestPrune: compact depth-pruned tree ensembles. In *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. 9417-9428. PMLR.
11. Zhao, L., Alipour-Fanid, A., Slawski, M., Zeng, K. (2018). Prediction-time efficient classification using feature computational dependencies. In *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2787-2796. <https://doi.org/10.1145/3219819.3220117>
12. Park, Y., Ho, J. C. (2019). Tackling overfitting in boosting for noisy healthcare data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 33(7), 2995-3006. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2959988>
13. Leiva, R. G., Anta, A. F., Mancuso, V., Casari, P. (2019). A novel hyperparameter-free approach to decision tree construction that avoids overfitting by design. *Ieee Access*, 7, 99978-99987. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930235>
14. James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-38747-0>
15. Murphy, K. P. (2012). *Machine learning: a probabilistic perspective*. MIT Press.
16. Wan, X., Wang, W., Liu, J., & Tong, T. (2014). *Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range*. BMC Medical Research Methodology, 14, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2288-14-135>.
17. Wasserman, L. (2013). *All of statistics: a concise course in statistical inference*. Springer Science & Business Media.
18. De Cock, D. (2011). Ames, Iowa: Alternative to the Boston housing data as an end-of-semester regression project. *Journal of Statistics Education*, 19(3), 1-15. <https://jse.amstat.org/v19n3/decock.pdf>

М. М. Злобін, В. М. Базилевич, доц., канд. екон. наук

НУ «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна

Підхід на основі даних для збалансування перенавчання та недонавчання в моделях дерева рішень

Стаття присвячена розробці підходу на основі даних для балансування надмірної (overfitting) та недостатньої пристосованості (underfitting) в моделях дерев рішень. Надмірна пристосованість зазвичай виникає, коли модель вловлює шум, зменшуючи узагальнення, тоді як недостатня пристосованість призводить до низької точності прогнозування. У дослідженні систематично налаштовувався параметр `max_leaf_nodes` та оцінювалась ефективність моделі за допомогою середньої абсолютної помилки (MAE). Мета полягала в тому, щоб знайти оптимальний баланс, який забезпечує точність моделі, запобігаючи при цьому її надмірній складності.

Регресор дерева рішень (A Decision Tree Regressor) навчався на наборі даних Ames Housing, який включає 79 пояснювальних змінних, пов'язаних з цінами на житло. Набір даних було розділено на навчальний та валідаційний набори (тобто на набори для навчання та перевірки). Модель оцінювалась шляхом ітерації над різними значеннями `max_leaf_nodes`, від 2 до 5000, і обчислення MAE для кожної конфігурації. Результати показали, що збільшення `max_leaf_nodes` спочатку покращувало точність, але після 400 вузлів MAE стабілізувалося на рівні 242,906, що свідчило про те, що подальше ускладнення не покращувало продуктивність. У статті підкреслено, що моделі з надто малою кількістю листкових вузлів не відповідають даним, тоді як моделі з надто великою кількістю листкових вузлів - надмірно пристосовуються, захоплюючи помилкові патерни. Для пом'якшення цієї проблеми використано систематичне налаштування гіперпараметрів для пошуку оптимальної конфігурації. Також досліджено вплив перехресної перевірки, скорочення та обмежень на глибину дерева на узагальнення моделі. Висновки свідчать, що вибір відповідного значення `max_leaf_nodes` запобігає надмірному пристосуванню, зберігаючи при цьому сильну прогностичну силу.

У статті показано важливість структурованого налаштування гіперпараметрів у моделях дерева рішень. Оптимальне значення `max_leaf_nodes` знаходиться на рівні 400. Фреймворк можна адаптувати до інших моделей машинного навчання, де MAE можна використовувати для оцінки продуктивності при різних налаштуваннях параметрів. Наприклад, у моделях випадкового лісу (Random Forest) кількість дерев можна оптимізувати аналогічно.

Результати підкреслюють, що налаштування складності моделі має важливе значення для досягнення точних прогнозів, уникаючи при цьому надмірного пристосування. У подальших роботах слід дослідити інтеграцію алгоритмів автоматизованого налаштування та ансамблевих методів для покращення продуктивності дерев рішень.

регресор дерева рішень, надмірне пристосування, перенавчання, недостатнє пристосування, недонавчання, оптимізація моделі, гіперпараметричне налаштування

Одержано (Received) 10.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

Volodymyr Kachurivskiy¹, Assoc. Prof., PhD ped. sci., **Anatolii Kotovskiy**¹,
Taras Lykhodid¹, **Hanna Kachurivska**¹, Assoc. Prof., PhD phys. and math. sci.,
Oleksandr Dorenskiy², Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹*Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany Agrotechnical Institute", Berezhany, Ukraine*

²*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*
e-mail: kv.orestovich@gmail.com, dorenskiop@kntu.kr.ua

The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI

The article proposes the criteria of the information and reference system for digitalisation of collection, storage, accounting and analysis of scientific publications (conference abstracts) of teachers of the Ukrainian higher education institution (HEI), providing reporting according to certain criteria and interactive data visualisation. The paper presents the results of modelling the structure of data storage that meets the standards of bibliographic description; digitalisation of reporting, which allows generating bibliographic references in APA, IEEE, DSTU 8302:2015 formats and exporting them to PDF, CSV, JSON, XML; implementation of dashboards for visualising statistical data in real time; forecasting scientific activity in accordance with licensing requirements, which allows analysing the dynamics of publications of teachers and students; substantiating the use of project architecture to provide remote access. The proposed approaches can be scaled up to take into account other types of scientific activity, such as scientific articles, methodological publications, patents, etc.

Prospects for further research are integration with external scientific platforms (Scopus, Google Scholar, ORCID), the use of artificial intelligence to forecast activity, introduction of a rating system and personalised settings for users. The developed system can be used as a SaaS solution for Ukrainian higher education institutions, which will contribute to the digital transformation of research management

digital transformation, licensing conditions, teacher's scientific activity, information system, database, monitoring, bibliographic reference, forecasting, digitalisation

Problem statement. Information technologies play an important role in the development of modern educational environment. Control over activities of subjects and objects of the educational sphere is carried out on the basis of communication management.

Communication management includes purposeful management of the flow of documented information that takes place in basic spheres of society, as well as in the economic, financial, legal, business and educational spheres. 'Documented information is information recorded on a material carrier with certain features that allow its identification' [1].

Documented information is conveniently managed through information systems implemented on modern information technologies. Accounting for the work of academic staff is an important component in management of an educational institution. One of the most pressing issues is monitoring the implementation of licensing conditions for the conduct of educational activities, in particular clause 38.12 of Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1187 'On Approval of Licensing Conditions for the Conduct of Educational Activities' [2].

Analysis of recent research and publications. The issue of informatisation of higher education institutions is aimed at automating and improving various aspects of their activities, including increasing productivity, improving quality of services, accelerating management,

and increasing the availability of information [3]. Administrative and legal regulation of informatisation in the field of education is considered in work [4]. The issue of educational management is a dynamic process and has a multifaceted nature: from the organisation of education to the presentation of educational materials by means of information systems. The problems of virtualisation of the educational environment [5, 6, 7, 8] for the organisation of a distance learning format have become relevant during martial law and are related to the security component. Learning is moving to an asynchronous mode. The services of organising accounting and control of the curriculum to ensure quality of educational process are covered in work [9].

‘Information technologies significantly improve access to information, increase communication opportunities during distance learning, increase efficiency and motivation of learning, provide new ways of presenting information that facilitate its understanding, and provide an opportunity to test your own ideas and projects’ [10, p.100]. The paper analyses modern learning platforms and their advantages in use.

Aspects of the use of information technology in management of a higher education institution are described in the work of I. Shorobura. In particular, it is noted that ‘the development of information management is associated with the organisation of data and knowledge processing system, their consistent development to the level of integrated automated management systems of higher education institution’ [11, p.189].

The use of information system for presentation of work programmes of educational components determines a number of advantages in communication management of higher education institutions and promotion of student centred policy in educational process [12, p.24]. Some works are focused on the development of management of an educational institution by means of information technology [13, 14].

The issue of virtualisation of monitoring the implementation of licensing conditions for the conduct of educational activities, in particular clause 38.12 of Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1187 ‘On Approval of the Licensing Conditions for the Conduct of Educational Activities’ [2], needs to be covered more thoroughly.

Studies [14-15] focus on digitalisation of municipal healthcare services in Ukraine. The developed information system for the provision of medical services by municipal healthcare facilities provided citizens with convenient access to information about medical services through a mobile application. This became possible due to ‘the creation and implementation of an improved model of the municipal information system of healthcare services with offline access, improvement of the model to provide access to data without an Internet connection, implementation of algorithms for the functioning of the client of the municipal IS of healthcare services for mobile platforms’ [14]. That is, studies [14-15] show that digitalisation can improve a business process or service, increase efficiency, facilitate the work of employees, ensure digitalisation of society, and enable scaling and integration of proposed business solutions.

Papers [16-17] present the results of digitalisation of educational processes at Zhytomyr Polytechnic State University. The results of these studies allow increasing efficiency to manage a class schedule, the process of preparing, reviewing and defending theses. The authors ‘for the first time implemented a complete digital transformation of the process of preparing theses, including electronic signatures, plagiarism check and integration with the university portal’, ‘reduced the workload of teachers and students, reduced the use of paper, and eliminated bureaucratic delays’ [17]. This positive effect was achieved precisely because of the digital transformation of academic processes.

Tasks statement. To digitise the process of monitoring scientific activity of research, teaching staff and students, where approbation publications on scientific or professional topics

are one of the types of such activity, it is necessary to develop the information and reference system that records these publications, generates reports according to certain criteria and provides prompt information on the state of scientific activity.

To achieve the goal, the following tasks need to be solved:

1. Based on the analysis of the structure of bibliographic reference to the abstract of a scientific conference report, identify entities and attributes for storing this information in the organisational structure.

2. To model a data output template in order to automate reporting in the form of a bibliographic reference in formats (APA, IEEE, etc.), with the ability to select information export formats (PDF, CSV, JSON, XML).

3. Develop a dashboard structure for visualising key monitoring indicators as web pages with interactive controls (in JavaScript using Chart.js, D3.js, etc.).

Results. Automation of monitoring of scientific activity of research and teaching staff (in particular, clause 38.12 of the Law of Ukraine ‘On Higher Education’) and higher education students should be carried out through the information and reference system ‘Theses’. The information and reference system of conference abstracts is a web-based platform for organising processes of collecting, storing, processing and analysing information on conference abstracts.

The system is responsible for implementing such precedents: Collection and storage of information on published abstracts of scientific conferences; Automation of reporting – generation of reports in the form of a bibliographic list based on templates according to certain criteria: research and teaching staff, student, department, faculty, calendar year, calendar period, field of knowledge; Dashboards with statistics – data visualisation using specialised libraries based on real data; Forecasting – formation of analytical data and a list of publications will be relevant in accordance with clause 38.12 of the Licence Terms in future.

To ensure remote access and collaboration with system resources, it is necessary to design a web-based platform based on a client-server architecture.

Modelling the structure of storing information about abstracts of scientific conferences. Analysing the requirements for the list of references in accordance with the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine of 12 January 2017, No. 40 (registered with the Ministry of Justice on 3 February 2017, No. 155/30023) and the National Standard of Ukraine ‘Information and Documentation. Bibliographic reference. General provisions and rules of compilation. DSTU 8302:2015’, it is possible to formalise information on abstracts of scientific conferences for storage in the Theses information and reference system.

By formalising data on scientific publications, information can be represented as a tuple, where each element corresponds to a certain attribute:

$$P=(Team; TP; TC; T; L; D; LI; C; Y; PD; Ps; Pf; URL; DOI; L), \quad (1)$$

where *Team* (*team of author*) is team of authors, *TP* (*title publication*) is thesis title, *TC* (*title conference*) is conference name, *TC* (*type of collection*) is collection type, *L* (*location*) is conference venue, *D* (*date event*) is the date of the conference, *LI* is responsible institution, *C* (*city*) is the city of the conference, *Y* is calendar year of the conference, *PD* (*publication date*) is the date of publication, *Ps* (*page start*) is home page of the publication, *Pf* (*page finish*) is final page of the publication, *URL* (*url*) is the link to electronic version, *DOI* (*doi*) is the link to electronic version, *L* (*language*) is the language of publication.

The set of tuples *P* is the set of theses (1) and is defined by the following formula:

$$Database = \sum_i P_i.$$

The author of the abstract in the bibliographic reference is represented by the surname and abbreviation of the first name, patronymic, or surname and abbreviation of the first name

in the language of publication (hereinafter referred to as the representation). In view of this, the representation of the author of a thesis can be given by one value from the list of representation options - surname, first name, and patronymic. The set of representations is determined by the formula:

$$N = \{n_i, i = \overline{1, k}\}, \quad (2)$$

where k – is the number of presentation options.

The universal set of all possible representations U consists of the union of the sets of representations (2) of all authors of theses that will be stored in the system.

$$U = N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_j, j = \overline{1, d} \quad (3)$$

where d is the number of authors.

The team of authors *Team* is represented as a list of one specific representation (2) for all authors of theses and is a list of elements of the universal set U of author representations:

$$Team = (a_i, i = \overline{1, c}) \subseteq U, \quad (4)$$

where c is the number of authors of one thesis.

The set U is a dynamic structure and is supplemented based on the analysis of the authors' representation when adding new bibliographic references.

Types of conferences constitute a set of possible types; conference name is an element of the set of conference names; responsibility is an element of the set of responsible institutions/organisers. These sets form database entities. Each entity has certain attributes. The following relationships are established between the entities:

- One conference abstract has a team of authors (1:n);
- One conference can be an attribute of several abstracts (1:n);
- One publisher can publish collections of scientific papers from different conferences (1:n);
- One type of conference can be inherent in several conferences (1:n);
- An arbitrary number of conferences can be held in one city (1:n);
- Several representations of the surname, name and patronymic record correspond to one author (1:n).
- Several authors can be responsible for one representation (1:n).

Taking into account the relationship between entities, a relational database structure was chosen to organise the storage of information, and a DBMS using non-procedural data management languages (SQL) was chosen for implementation.

Information is collected into the database based on the GUI user interface with consideration of UX. GUI provides the attributes defined by formulas (1), (2), (4). When designing GUI, it is necessary to ensure the addition of fields for entering the authors of the publication, since the number of authors is an uncertain condition and fuzzy criteria when designing the interface. In addition, to eliminate errors when entering information, it is necessary to ensure initial (technical) validation of the data according to the main criteria: compliance with one input language; absence of special characters; elimination of unnecessary spaces, etc. The final validation is carried out by the relevant department.

The collection of information can be automated on the basis of a JSON file that has the structure in accordance with (1), (2), (4). To work together with the information system, it is necessary to define user roles and delegate to them the rights to work with the database and system precedents. The role-based access model implements access rights to the information system resources of users by linking roles to accounts.

Automation of reporting. An important functionality of the system is the automation of reporting based on database queries according to certain criteria. The main criteria are: calendar period of time (calendar year, academic year, semester of the academic year, last five years); name of the academic staff member or student; department or faculty. These criteria can be used separately or in combination.

A reporting document is generated on the basis of a template of a specific form. Reporting automation is performed programmatically using the object-oriented programming paradigm. The base class *Publication* has been developed, which has some of the properties (1), (4) and abstract methods. The base class can be used to store data about other scientific publications. The child class *Thesis* complements the properties of the base class in accordance with (1), (2), (4) and overrides abstract methods that construct a bibliographic reference of the thesis using a template in the format of DSTU 8302:2015, APA, IEEE or others. The class diagram is shown in Figure 1.

When an object of the *Thesis* class is initialised, the *team* array (the result of an SQL query for the team of authors by the abstract's Primary key identifier) and the *attr* array (the result of an SQL query for the publication's attributes by the abstract's Primary key identifier) are passed to the constructor. To obtain data on the team of authors (*team*) and publication attributes (*attr*), a query is executed where the publication identifier is specified in the selection criterion.

To obtain the list of publications of one academic staff member (ASM), it is necessary to follow the algorithm:

1. Select all primary keys of publications where the academic staff member is in the team of authors.

2. Search the obtained publication keys: 2.1) For the current key, run a query to get the publication attributes; 2.2) For the current key, run a query to get the data of the team of authors and their views.

3. The received data initialises an object of the *Thesis* class. The constructor parses the received arrays, assigns their values to the corresponding class properties.

4. Objects are elements of the *List_thesis* data organisational structure, which is used for further display on the web platform, generating a test file or PDF report, exporting data in JSON, XML format.

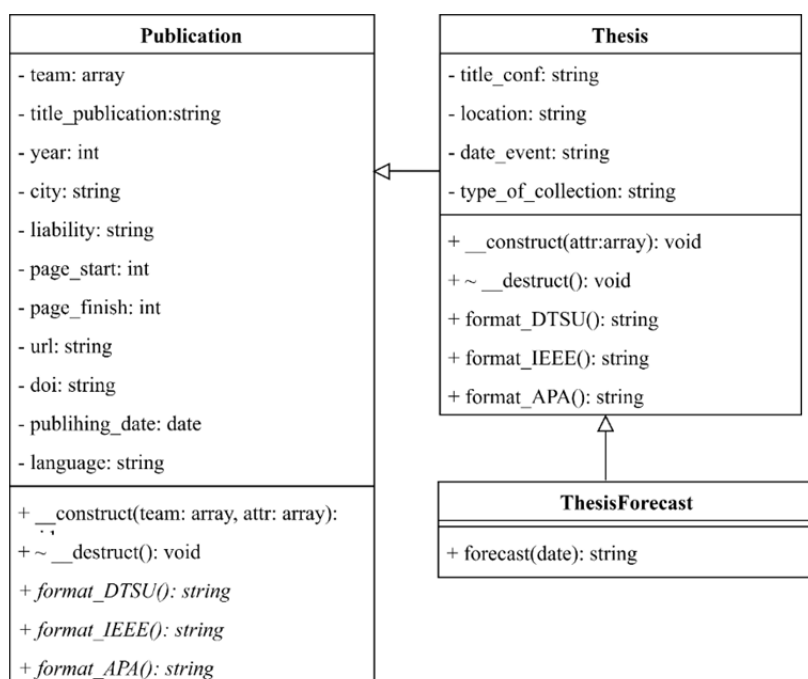


Figure 1 – Class diagram of the Thesis project

Source: developed by the authors.

The *format_DTSU()* method of the *Thesis* class generates text value as a bibliographic reference of a publication in accordance with the requirements of DSTU 8302:2015 using the following basic formatting template: Author(s). Title of the paper. Name of the conference: type of proceedings, city of the conference, date of the conference / Information about responsibility. City of publication, year of publication. Pages.

The code snippet for implementing the *format_DSTU()* method of the described object in the PHP server logic language is as follows:

```
public function format_DSTU() {
    $team = implode(", ", $this->team);
    $reference = "$team $this->title_publication. 
    <em>$this->title_conf:</em> $this->type_of_collection,
    $this->location, $this->date_event / 
    $this->liability. $this->city, 
    $this->year. C. $this->pages_start &nbsp;
    $this->pages_finish.";
    if (!empty($this->url)) {
        $reference .= " URL: $this->url";
    }
    if (!empty($this->doi)) {
        $reference .= " DOI: $this->doi";
    }
    return "<p>$reference</p>";
}
```

Mandatory spaces for separating template elements are marked with the ` ` code. The *format_APA()* and *format_IEEE()* methods generate a ribbon according to the basic APA and IEEE format templates, respectively. The methods of generating templates can be improved with the following functionality: handling empty class properties; removing duplicate spaces or periods, etc.; transliterating bibliographic references into English; converting text values to the ‘As in sentences’ format; adding design styles in accordance with the web platform design. Such additional validation is necessary to bring the bibliographic reference to a single format.

By supplementing the query with the criterion ‘range of calendar dates’, the reporting of an individual research and teaching staff member on scientific activities for the calendar period is generated.

Monitoring and forecasting research activities. The monitoring provides up-to-date information on the number of abstracts of publications based on the selection criterion ‘last five years’. If the number of sample items is at least five, the professional activity is confirmed in accordance with clause 38.12 of the Licence Terms [2]. If the number is less than five, proposals are provided to keep this professional activity up to date. The forecast is presented in the form of a dashboard with publication statistics for the years and a general list of publications *list_thesis*.

The management of the higher education institution is responsible for compliance with and implementation of the Licence Terms, so it is interested in forecasting the state of implementation of clause 38.12 in future.

The methodology of forecasting software implementation is as follows:

1. Create a collection of objects of the *ThesisForecast* class based on the selection of publications according to the additional query criterion ‘publication date’ in the range from the current date *current_date* to the current date minus five years (*current_date* - 5 years).

2. Organise the passage of the collection and apply the *forecast(date_forecast)* method to each object, to which the calendar date of the forecast is passed - *date_forecast*. This method compares the value of the *publishing_date* attribute in the range from *date_forecast* to *date_forecast* - 5 years (*item_active*).

3. The method returns two values *active_item* and *message*: *active* = *False* or *True*, depending on whether the publication date belongs to the *item_active* range. The message is the value of the *format_DSTU()* method, which is additionally provided with a CSS styling class (*active_item* = *False*) that visually distinguishes the text of a bibliographic reference when displayed on a web platform. In report documents, this is the corresponding marker.

4. Sum the values of *active_item* using the formula $active = \sum active_item$ and create a list of publications. Provide a conclusion: if $active \geq 5$, then clause 38.12 is ‘fulfilled’, otherwise ‘not fulfilled’. In case of non-fulfilment, the number of publications required to grant the status of ‘fulfilled’ is indicated.

A partial case of forecasting is the submission of proposals to the individual plan of the academic and pedagogical staff (APS) for the next academic year. For this purpose, we add a calendar year to the selected forecast date (start of the academic year: 09/01/2026) and follow the forecast precedent.

All the precedents identified can also be used to analyse and report on the research activities of higher education students.

Development of dashboards for data visualisation. A dashboard is a software solution that allows processing data in real time (i.e. create, receive, analyse digital information) and visualise statistical information. Dashboards are best used for information where queries group data using aggregate functions. Such queries include: the number of publications of a department, faculties, familiarisation with the geography of publications, etc.

The dashboard template consists of two blocks:

Block 1: The container that displays statistical data of the factor in the form of a table ‘indicator → value’.

Block 2: A container for visualising statistical data.

Since we have a web-oriented information system, it is advisable to visualise it using the Chart.js, D3.js, Google Chart, etc. libraries.

All libraries have patterns of various data visualisation. To create a real-time visualisation, it is necessary to sample operational data. Using Chart.js library as an example, to build a chart, it is essential to have the values of the *labels* and *data* parameters. To obtain real-time data, it is advisable to use AJAX technology, which allows processing server response without blocking main thread of execution. The *fetch()* method, which is used in JavaScript to send HTTP requests (GET, POST, etc.) and process responses, corresponds to the declared technology. Response processing implements the formation of *labels* and *data* parameters for data visualisation.

Discussion. This paper presents the concept and aspects of practical implementation of information and reference system for monitoring scientific activity of teachers and students. This system for a university provides digital recording and storage of bibliographic references to conference abstracts, digitalises reporting by various criteria, visualises data through interactive dashboards, and forecasts research activity in accordance with licensing requirements. Based on the conclusions drawn from the analysis of recent research and publications, this work is valuable and provides a positive effect in the implementation of business processes of higher education institutions in Ukraine.

At the same time, the following prospects for further work on the project are already visible.

1. Integration with external platforms. It is promising to implement communication with scientific databases, synchronisation with Scopus, Google Scholar, ORCID. This will ensure automatic import of information about conference abstracts. Import and export of data can also be effective by implementing support for XML, JSON, CSV, BibTeX export formats, as well as integration with LMS.

2. Authors do not exclude the possibility of using the system to automatically generate a researcher's profile, i.e. to create a portfolio for each teacher or employee of a higher education institution.

3. The need to improve analytics and forecasting is expected to arise in the future. Therefore, the prospect of further work is the creation of additional analytical tools: dashboards for analysing the number of publications, co-authorship, and popularity of conferences.

4. The introduction of AI for the forecasting is already relevant. The use of machine learning algorithms will allow for more accurate forecasting of scientific activity.

5. A valuable development and improvement is the implementation of the possibility to assess the effectiveness of departments or faculties, as well as the rating of researchers and teachers.

6. Prospects for practical implementation are obviously expanding the functionality of the system. The addition of reminder and notification functions will be very useful, as automatic reminders of the need for publications to meet licensing requirements.

Attention should also be paid to personalisation mechanisms, i.e. the ability to customise the interface and choose convenient visualisation formats, digitalisation of data entry through text recognition, automatic data entry from PDFs and scanned documents.

7. Already at this stage of project implementation, it is worth starting to create opportunities for commercialisation, taking as an example positive experience of creating 'Zhytomyr Polytechnic Science Park' LLC and 'Innovation Hub' [18]. After all, e-service for monitoring research activity of teachers and students is a good offer for Ukrainian universities; this system can be used as a SaaS for universities.

Thus, this work has real prospects for further development: integration with external scientific platforms, improvement of analytics, automation of data entry, personalisation of user experience, and further commercialisation of the project.

Conclusions. The information and reference system 'Thesis' is an element of communication management of a higher education institution. It has the functions of promptly informing about aspects of scientific activity of research and teaching staff, and students, automated generation of reporting documentation, in particular in text and PDF formats, monitoring the relevance of clause 38.12 of the Licence Terms and forecasting future professional activity of participants in educational activities.

To organise remote access and collaborative work of users, the information and reference system is based on a client-server architecture and implemented as a web-based platform by means of information technologies.

The analysis of the structure of forming a bibliographic reference to an information source has allowed identifying entities and necessary attributes for organising the storage of documented information. The entities have been identified and the necessary and sufficient attributes for information preservation have been determined. The relationships between data entities are established, which are the basis for creating the structure of a relational database.

The developed conceptual models of the database, class structures, data processing methods, templates for generating bibliographic references to published abstracts of scientific conferences in various formats, and the methodology to forecast professional activities for the publication of testing materials on scientific or professional topics can be implemented by a diverse stack of software tools from the server to the client parts of the web platform.

The proposed approaches to database design and object-oriented classroom modelling can be scaled up when developing information systems for accounting scientific papers, scientific and methodological publications, inventive activity, etc. Further development of the information system may include integration with other educational platforms, integration of the list of published abstracts into the portfolio of academic staff and individual student cards, expansion of analytical tools, improvement of the notification system, and user personalisation mechanisms. Automation of data entry from ORCID and Google Scholar information systems is promising.

List of references

1. Пелеха Ю.І. Документально-інформаційні комунікації як основа комунікативного менеджменту. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2016. № 1. С. 56-61.
2. Постанова Кабінету Міністрів України № 1187 "Про затвердження Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1187-2015-%D0%BF#Text> (дата звернення: 18.01.2025).
3. Жовнірчик Л. Інформатизація вищої освіти - важливий аспект інтеграція у світовий освітній простір. *Суспільство, наука, освіта: актуальні дослідження, теорія та практика: тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. (23-24 листоп. 2023 р.)*. Біла Церква, 2023. С. 21-23.
4. Легенький М.І. Адміністративно-правові засади формування та реалізації державної політики у сфері освіти: дис. ... докт. юрид. наук: 12.00.07 / НУ «Львівська політехніка». Львів, 2018. 513с.

5. Ковальова О.М. Інформаційне забезпечення освітнього процесу вищої школи : 84-а наук.-техн. та наук.-метод. конф. ун-ту. зб. матеріалів, 11–14 трав. 2020 р. Харків, 2020. С. 9–12.
6. Пашков В.В. Віртуалізація освіти: пріоритети і ризики. Гілея: науковий вісник. 2014. Вип. 86. Р. 288–291. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gileya_2014_86_74 (дата звернення: 26.02.2025)
7. Polotai O. Methodological approaches development management program virtualization high school. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2016. Issue14. Р. 53–60.
8. Prydatko O., Pashnak I. Scientific Bulletin of National mining university: Scientific works. Dnipro : National Mining University, 2017. Issue 1(157). Р. 108–113.
9. Придатко О.В., Бурак Н.Є., Дзень В.Є., Кунинець М.С. Адаптивна інформаційно-довідкова система "UniBell" як складова частина проєкту "Smart-університет". Науковий вісник НЛТУ України. 2020, т. 30, № 5. С. 113–121. DOI: 10.36930/40300518.
10. Сіняєва О., Крєкот М., Завгородній О., Сичова Т., Сичов А., Сіняєва О. Особливості використання інформаційних технологій в освіті. Освіта. Інноватика. Практика, 2023. № 7, т. 11. С. 98–104. DOI:10.31110/2616-650X-vol11i7-013.
11. Шоробура І. Використання інформаційних технологій в управлінні вищим навчальним закладом. Педагогічний дискурс. 2016. Вип. 21. С. 187–192.
12. Качурівський В.О., Качурівська Г.М. Модулювання інформаційно-документальної системи презентації освітніх компонент освітньої програми. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 6(37), ч. II. С. 17–25. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.17-25.
13. Придатко О.В., Бурак Н.Є., Дзень В.Є., Кунинець М.С. Запровадження інформаційно-довідкової системи "UniBell" у освітнє середовище вищого навчального закладу. Український журнал інформаційних технологій. 2020. № 1, т. 2. С. 57–65. DOI: 10.23939/ujit2020.02.057.
14. Бурячківський Е.С. Анненкова І.П., Шпильова К.О. Інформаційний менеджмент у закладах вищої медичної освіти. Сучасні напрями змін в управлінні охороною здоров'я: модернізація, якість, комунікація: Міжнар. наук. конф., 31 трав. 2024 р., м. Одеса. Львів – Торунь : Liha-Pres, 2024. С. 63–66.
15. Dorenskiy O., Drobko O., Driev O. Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. 2022. Вип. 5(36), ч. 2. С. 3–10. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10.
16. Морозов А.В., Вакалюк Т.А., Плечистий Д.Д., Зосімович Д.М. Вдосконалення архітектури наявного програмного комплексу управління розкладом Державного університету "Житомирська політехніка". Зб. наук. пр. НУК. Миколаїв : НУК, 2022. № 1 (488). С. 62–72.
17. Morozov, A.V., Vakaliuk, T.A., Duniev, S.S., Kubrak, Y.O. and Medvediev, M.G., 2024. Digital transformation of the thesis preparation and defence: case of Zhytomyr Polytechnic State University. CTE Workshop Proceedings. 2024. Vol. 11. P.158–173. DOI: 10.55056/cte.674.
18. Innovation Hub : TISC - Центр підтримки технологій та інновацій : вебсайт. URL: <https://inhub.ztu.edu.ua/tisc/> (date of access: 26.02.2025).

References

1. Palekha, Yu. I. (2016). Documentary and informational communications as the basis of communicative management. *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia*, (1), 56–61 [in Ukrainian].
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2015). On approval of the licensing conditions for conducting educational activities (Resolution No. 1187). Retrieved January 18, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1187-2015-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
3. Zhovnirchuk, L. (2023). Informatization of higher education as an important aspect of integration into the global educational space. In *Society, science, education: Current research, theory, and practice: Abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference* (pp. 21–23). Bila Tserkva. [in Ukrainian].
4. Lehenkyi, M. I. (2018). Administrative and legal principles of formation and implementation of state policy in the field of education (Doctoral dissertation, Lviv Polytechnic National University). [in Ukrainian].
5. Kovaleva, O. M. (2020). Information support of the educational process of higher education. In *Proceedings of the 84th scientific-technical and methodological conference* (pp. 9–12). Kharkiv. [in Ukrainian].
6. Pashkov, V. V. (2014). Virtualization of Education: Priorities and Risks. *Gileia: Scientific Bulletin*, 86, 288–291 [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gileya_2014_86_74.
7. Polotai, O. I. (2016). Methodological approaches development management program virtualization high school. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 14, 53–60.
8. Prydatko, O., & Pashnak, I. (2017). Investigation of the processes of information technology integration into the training of specialists at mine rescue departments. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 157(1), 108–113.
9. Prydatko, O. V., Burak, N. E., Zen, V. E., & Kunynets, M. S. (2020). Adaptive information-reference system "UniBell" as an integral part of the "Smart University" project. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(5), 113–121 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36930/40300518>.

10. Sinyayeva, O., Krekot, M., Zavgorodniy, O., Sycheva, T., Sychev, A., & Snyayeva, O. (2023). Features of the use of information technology in education. *Education. Innovation. Practice*, 11(7), 98–104 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i7-013>.
11. Shorobura, I. (2016). The use of information technologies in the management of a higher education institution. *Pedahohichnyi diskurs*, 21, 187–192 [in Ukrainian].
12. Kachurivskiy, V. O. & Kachurivska, H. M. (2022). Modeling of the information and documentary system of presentation of educational components of the educational program. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 6(37, Pt. 2), 17–25 [in Ukrainian] DOI: 10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.17-25.
13. Prydatko, O. V., Burak, N. E., Zen, V. E. & Kunynets, M. S. (2020). Implementation of the information and reference system “UniBell” in the educational environment of a higher education institution. *Ukrainskyi zhurnal informatsiinykh tekhnolohii*, 2(1), 57–65 [in Ukrainian] DOI: 10.23939/ujit2020.02.057.
14. Buryachkivskiy, E. S., Annenkova, I. P., & Shpylova, K. O. (2024). Information management in higher medical education institutions. *Suchasni napriamy zmin v upravlinni okhoronoiu zdorovia: modernizatsiia, yakist, komunikatsiia: Mizhnarodna naukova konferentsiia*. (pp. 63–66). Liha-Pres. [in Ukrainian].
15. Dorenskyi, O., Drobko, O., & Drieiev, O. (2022). Improved model and software of the digital information service of the municipal health care institutions. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, Issue 5(36), Pt. 2, 3–10. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/5\(36\)_II/3.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/5(36)_II/3.pdf).
16. Morozov, A. V., Vakaliuk, T. A., Plechystyi, D. D., & Zosimovych, D. M. (2022). Improvement of the existing software architecture for the schedule management system at Zhytomyr Polytechnic State University. [Improving the architecture of the existing software package for managing the schedule of Zhytomyr Polytechnic State University]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 1(488), 62–72 [in Ukrainian]. Retrieved from <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/6213>.
17. Morozov, A. V., Vakaliuk, T. A., Duniev, S. S., Kubrak, Y. O., & Medvediev, M. G. (2024). Digital transformation of the thesis preparation and defence: Case of Zhytomyr Polytechnic State University. *CTE Workshop Proceedings*, 11, 158–173. <https://doi.org/10.55056/cte.674>.
18. Innovation Hub : TISC - Tsentr pidtrymky tekhnolohii ta innovatsii. (n.d.). Retrieved February 26, 2025. <https://inhub.ztu.edu.ua/tisc/> [in Ukrainian].

В. О. Качурівський¹, доц., канд. пед. наук, **А. А. Котовський**¹, **Т. А. Лиходід**¹,

Г. М. Качурівська¹, доц., канд. фіз.-мат. наук, **О. П. Доренський**², доц., канд. техн. наук

¹Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Концепція цифрової трансформації моніторингу наукової активності учасників освітнього процесу в українському ЗВО

Ця наукова праця присвячена вирішенню науково-технічного завдання синтезу інформаційно-довідкової системи для цифровізації збору, збереження, обліку й аналізу наукових публікацій (тез конференцій) викладачів закладу вищої освіти в Україні, забезпечуючи цифрове формування звітності за визначеними критеріями та інтерактивну візуалізацію даних. У статті представлені: результати моделювання структури збереження даних, що відповідає стандартам бібліографічного опису; цифрову трансформацію процесу створення звітності, яка дозволяє формувати бібліографічні посилання у форматах APA, IEEE, ДСТУ 8302:2015 та експортувати їх у PDF, CSV, JSON, XML; реалізацію дашбордів для візуалізації статистичних даних у реальному часі; прогнозування наукової активності відповідно до ліцензійних вимог, що дозволяє аналізувати динаміку публікацій викладачів та студентів; обґрунтовано застосування архітектури проекту для забезпечення віддаленого доступу та можливості спільної роботи з системою. Запропоновані в статті підходи й рішення можуть бути масштабовані для обліку наукової діяльності, серед яких наукові статті, навчально-методичні видання, патенти і інші академічні активності й досягнення, які передбачені чинними в Україні Ліцензійними умовами провадження освітньої діяльності.

Перспективами подальших розвідок є інтеграція створеної інформаційно-довідкової системи із зовнішніми науковими платформами (Scopus, Google Scholar, ORCID), використання ШІ для прогнозування активності, впровадження рейтингової системи та персоналізованих налаштувань для користувачів.

Розроблена інформаційно-довідкова система може бути використана як SaaS-рішення для закладів вищої освіти в Україні, що сприятиме цифровій трансформації управління науковою діяльністю.

цифрова трансформація, ліцензійні умови, наукова активність викладача, інформаційна система, база даних, моніторинг, бібліографічне посилання, прогнозування, цифровізація

Одержано (Received) 28.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 07.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

І. А. Котов, проф., д-р техн. наук, **Д. В. Швець**, доц., канд. техн. наук, **Н. О. Карабут**
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
e-mail: dmitriy.shvets@knu.edu.ua

Аналіз еволюції об'єктно-орієнтованої парадигми в патернах мови Java для мультиплатформних середовищ

Дослідження спрямоване на аналіз еволюції об'єктно-орієнтованої парадигми у контексті розвитку патернів мови Java для мультиплатформних середовищ. Акцент робиться на тому, як зміни в архітектурних підходах, зумовлені вимогами кроссплатформності, вплинули на трансформацію об'єктно-орієнтованої парадигми — від класичних принципів інкапсуляції та поліморфізму до сучасних гібридних рішень. Мета роботи — виявити зв'язок між адаптацією Java-інструментів та зростанням актуальності патернів, що забезпечують сумісність коду з різноманітними платформами.

У статті простежено еволюційний шлях об'єктно-орієнтованої парадигми у Java, починаючи з ери WORA, де віртуальна машина (JVM) була основним механізмом абстракції від платформ, до сучасних підходів, що поєднують нативну компіляцію з гнучкими архітектурними патернами. На прикладах JavaFX та Spring Boot показано, як інкапсуляція платформи-залежних деталей і поліморфізм перетворилися на інструменти створення універсальних інтерфейсів, здатних адаптуватися під мобільні, десктопні та хмарні середовища.

Детально досліджено роль патернів проектування у контексті мультиплатформності. Вони розглядаються як динамічні механізми, що еволюціонували разом із Java. Окремо аналізуються виклики, такі як зростання складності архітектури при інтеграції з нативними API або обмеження продуктивності JVM у порівнянні зі скомпільованими рішеннями. Показано, як модульність допомагає подолати ці обмеження, зберігаючи переваги об'єктно-орієнтованої парадигми.

Аналіз еволюції об'єктно-орієнтованої парадигми в Java свідчить, що її принципи — інкапсуляція платформи-залежної логіки та поліморфізм для єдиного інтерфейсу — залишаються основою для створення гнучких мультиплатформних систем. JVM поступово доповнюється інструментами, що відкривають доступ до хмарних середовищ, IoT і нативної оптимізації. Патерни проектування трансформуються з класичних шаблонів у механізми адаптації, балансуючи між універсальністю та специфікою платформ. Сучасні виклики, зокрема компроміс між продуктивністю JVM та нативними рішеннями, а також інтеграція з вузькоспеціалізованими API, вимагають глибшого синтезу об'єктно-орієнтованої парадигми з новими підходами. Розвиток гібридних парадигм і фреймворків формує майбутнє Java, де архітектурна гнучкість дозволяє здолати технологічні обмеження, зберігаючи актуальність мови в умовах фрагментації цифрових екосистем.

абстракція, адаптація, інтерфейс, інфраструктура, клас, мультиплатформність, парадигма, патерн, додаток, фреймворк

Постановка проблеми. Сучасна цифрова екосистема характеризується безпрецедентним розмаїттям пристроїв і платформ, що включають мейнфрейми, персональні комп'ютери, мобільні гаджети, IoT-пристрої та хмарні середовища. Це розмаїття зумовлює необхідність створення програмного забезпечення (ПЗ), здатного ефективно працювати в мультиплатформних середовищах без втрати продуктивності та функціональності. Сьогодні мультиплатформність перестала бути опціональною і є обов'язковою вимогою для більшості комерційних і наукових програмних проєктів.

Забезпечення мультиплатформності - це не тільки суто технічне завдання, але також і необхідність переосмислення традиційних підходів до проектування інформаційних систем, де універсальність не повинна суперечити оптимізації, а гнучкість - ускладнювати код.

Остання обставина призводить до необхідності аналізу розвитку сучасних парадигм інженерії програмного забезпечення. Як базову парадигму розглядають об'єктно-орієнтований підхід (ООП), що реалізується в ефективних патернах для практичних реалізацій у мультиплатформних середовищах. Найбільший інтерес для такого аналізу мають яскраво виражені ООП-орієнтовані мови розробки ПЗ. Безперечно, до таких належить мова програмування Java.

Java на практиці реалізує компроміс між суворою об'єктною типізацією, з одного боку, і переносимістю з можливостями масштабування, з іншого боку. Цей компроміс стає особливо критичним в епоху, коли додатки дедалі частіше реалізуються одночасно на кількох платформах, а їхній життєвий цикл вимірюється роками з вимогою множинних оновлень і розширень.

Виходячи зі сказаного, можна констатувати, що, з урахуванням практично лідируючих позицій, для інфраструктури Java найактуальнішою на сьогодні є проблема забезпечення мультиплатформності реалізації програмних проєктів на ідеологічній основі патернів мови. Останнє забезпечує архітектурні рішення, що дають змогу зберігати сутність додатка незмінною, лише адаптуючи його «оболонку» до вимог конкретного операційного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Історично Java стала однією з перших мов, які запропонували розв'язання проблеми мультиплатформності через концепцію WORA («Write Once, Run Anywhere») [1]. Віртуальна машина (JVM) абстрагувала розробника від особливостей конкретних операційних систем. Однак із часом вимоги до мультиплатформності ускладнилися: сьогодні недостатньо просто запустити код на різних ОС - потрібно забезпечити адаптацію інтерфейсів, оптимізацію під апаратні особливості та інтеграцію з екосистемами конкретних пристроїв (наприклад, мобільні push-повідомлення або десктоп-інтеграції).

У цьому контексті ООП виступає не просто парадигмою, а стратегічним інструментом для створення гнучких масштабованих архітектур. Принципи ООП, такі як інкапсуляція та поліморфізм, дають змогу ізолювати платформи-залежну логіку, зберігаючи ядро програмної системи незалежним від зовнішніх умов. Наприклад, абстракція графічного інтерфейсу в JavaFX [2] або Swing [3] дає можливість розробляти єдиний UI-шар, який адаптується під різні оточення, зберігаючи узгодженість внутрішньої бізнес-логіки.

Очевидною є тенденція - нативна розробка сьогодні активно еволюціонує в напрямі кросплатформного підходу, що активно розвивається розробниками та досліджується науковцями [4, 5]. Незважаючи на те, що платформу Java було презентовано ще наприкінці ХХ століття, сьогодні вона отримує свій розвиток у контексті мультиплатформної розробки мобільних застосунків [6, 7], зокрема з використанням мови програмування Kotlin [8], яка працює на базі JVM [9, 10].

Постановка завдання. У роботі поставлено завдання аналізу впливу парадигми ООП на мультиплатформну адаптацію коду шляхом впровадження патернів у практику проєктування для забезпечення гнучкості та масштабованості кросплатформних систем, а також виявлення технічних та архітектурних складнощів, що виникають під час розроблення універсальних рішень на Java.

Викладення основного матеріалу. ООП сьогодні можна розглядати як філософію проєктування, що трансформує складність мультиплатформних систем у керовану структуру. Його перевага полягає у здатності створювати абстракції, які відображають сутність предметної області, залишаючись інваріантними щодо зовнішніх умов. У контексті мультиплатформності ООП дає змогу відокремити абстрактну сутнісну функціональність від практичної реалізації в конкретному середовищі, що забезпечує можливість порівняно легкої адаптації до платформи.

Адаптивність реалізується через багаторівневу архітектуру, де кожен рівень інкапсулює певний аспект роботи застосунку. Взаємодія з операційною системою або

апаратними ресурсами може бути прихована за інтерфейсами, які залишаються незмінними для бізнес-логіки. Цей механізм адаптує універсальні інструкції в зрозумілій конкретній платформі команди, не вимагаючи коригування основного коду Java з її акцентом на інтерфейси й абстрактні класи та надаючи природне середовище для вироблення рішень - чи то робота з файловою системою через *java.nio* [11], де прихованими залишаються відмінності між Windows і Linux, чи то рендеринг графіки в JavaFX, що абстрагується від нативних GUI-бібліотек.

Важливим фактором адаптивності є поліморфізм, що дає змогу програмним об'єктам набувати різних форм залежно від контексту виконання. Наприклад, клас, що відповідає за мережеву комунікацію, може мати реалізації для десктопних застосунків (на базі стандартних сокетів) і мобільних пристроїв (з оптимізацією під енергоефективність), але викликатися через єдиний метод *sendData()*. Це не тільки спрощує підтримку коду, а й забезпечує можливість «підключати» в міру необхідності платформи-залежні модулі.

Водночас адаптивність означає здатність системи еволюціонувати. Спадкування і композиція в ООП дають змогу розширювати функціональність без порушення наявної логіки. Наприклад, під час додавання підтримки нової IoT-платформи розробник може створити спадкоємця базового класу *DeviceController*, перевизначивши методи ініціалізації та обміну даними, зберігаючи водночас загальну структуру управління пристроями. У Java це особливо важливо з огляду на її застосування в «довгоживучих» масштабованих enterprise-системах, де вимоги до підтримки нових платформ виникають регулярно. Однак необхідно зазначити, що надлишкова абстракція може призвести до ситуації, коли код стає занадто загальним, втрачаючи ефективність на конкретних платформах. Наприклад, спроба створити універсальний UI-компонент для всіх пристроїв іноді обертається втратою нативної «чутливості» компонента. І тут на допомогу приходять патерни проектування. Вони нормалізують баланс між універсальністю та специфічністю. У Java це проявляється в підходах, коли фреймворки (наприклад, Spring Boot [12]) використовують *dependency injection* [13] для динамічного вибору реалізацій залежно від оточення, зберігаючи основу програми платформи-незалежною.

Таким чином, можна сформулювати загальну парадигму для підходів до кросплатформного розроблення програмного забезпечення, яка водночас спирається на принципи ООП, платформи-незалежну інтерпретацію та абстракції, які реалізуються через патерни. Цю схему наведено на рисунку 1.

Мова Java реалізує зазначені вище принципи. Позитивною особливістю Java є її здатність стирати кордони між платформами, перетворюючи код на універсальну мову, зрозумілу будь-якому середовищу. JVM не просто інтерпретує байт-код, а створює ізольоване середовище, де застосунок функціонує за єдиними правилами, незалежно від того, чи запущено його на Windows, Linux, чи вбудовано в мікроконтролер через Java ME.

Однак сьогодні підтримка принципів мультиплатформності вимагає більшого, ніж проста сумісність на *runtime*-рівні. Розробникам необхідно створювати інтерфейси, які виглядають «нативно» на кожному пристрої, інтегруватися з хмарними сервісами та керувати ресурсами в умовах обмежень мобільних гаджетів. Вирішення цих завдань забезпечують фреймворки, перетворюючи абстрактні ідеї WORA на конкретні інструменти. Наприклад, JavaFX пропонує єдину модель для побудови графічних інтерфейсів, які автоматично адаптуються під стиль macOS, Windows або мобільних ОС, зберігаючи логіку взаємодії незмінною. А вищезгаданий Spring Boot, що став стандартом для enterprise-рішень, дає змогу розгортати додатки в будь-якому середовищі - від локального сервера до хмарного кластера, абстрагуючись від специфіки інфраструктури.

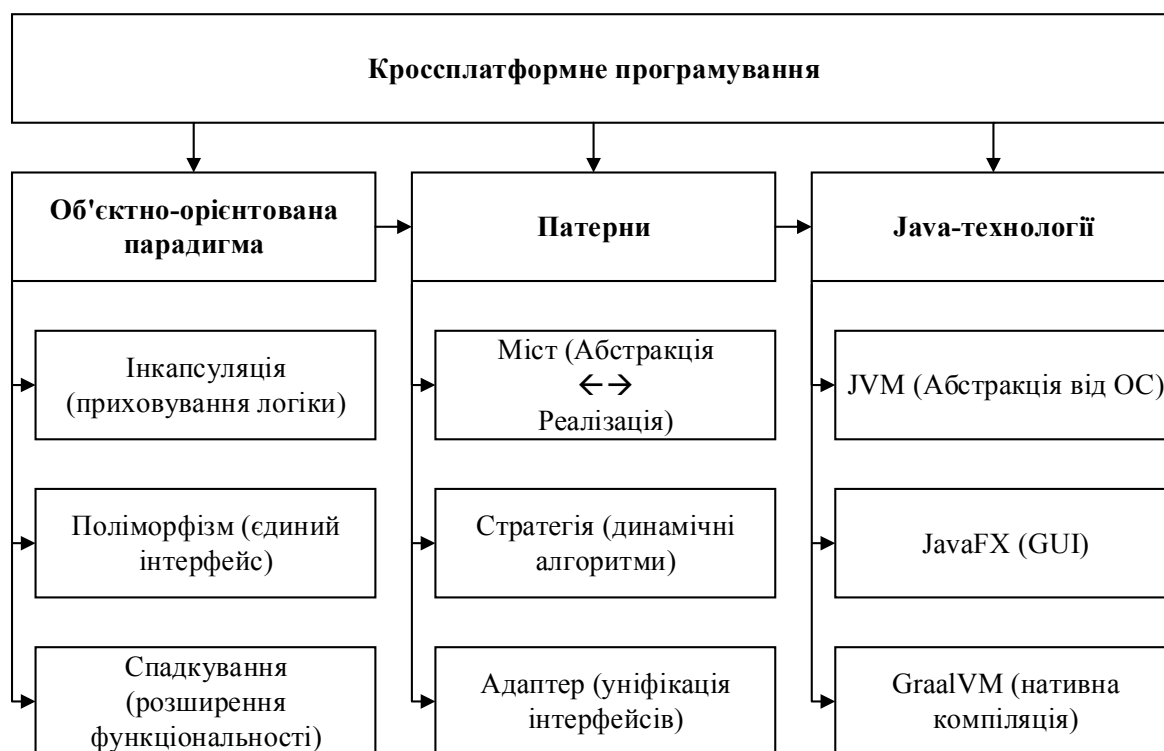


Рисунок 1 – Взаємозв'язок складових кроссплатформного програмування

Джерело: розроблено авторами

Важливим кроком в еволюції Java стала модульність, яка перетворила монолітні додатки на набори гнучких компонентів. Наприклад, модуль для роботи з сенсорами може бути активований тільки в мобільній збірці, а десктоп-версія отримує розширені можливості роботи з файлами. Така вибірковість знижує накладні витрати і робить додатки більш адаптивними до вимог цільового середовища.

Водночас Java не обмежується «віртуальним» світом. Такі проекти, як GraalVM [14], розширюють її можливості, компілюючи байт-код у нативні бінарники для Linux, macOS або навіть IoT-пристроїв. Це значною мірою знімає взаємні протиріччя між кроссплатформністю та нативною продуктивністю, даючи змогу Java конкурувати з мовами на кшталт C++ у галузях, де раніше її вважали непридатною. Інструменти типу RoboVM демонструють, як Java-код може взаємодіяти з iOS-бібліотеками, перетворюючись на «міст» між екосистемами. Бібліотеки на кшталт Apache Commons [15] або Google Guava [16] пропонують готові абстракції для роботи з мережею, файлами або багатопоточністю, приховуючи платформи-залежні деталі за універсальними інтерфейсами. Навіть такі «дрібниці», як опрацювання переведення рядків у різних ОС, вирішуються через класи та відповідні методи (наприклад, `System.lineSeparator()`), які автоматично підлаштовуються під середовище виконання.

Детальний аналіз патернів проектування в Java демонструє, що їх можна розглядати як деяку мову, якою архітектура веде діалог з мінливістю платформ. Патерни формалізували досвід поколінь програмістів, перетворивши хаос платформи-залежних нюансів на систематизовані впорядковані структури. Загальну класифікацію патернів проілюстровано на рисунку 2.

У контексті мультиплатформності саме патерни стають мостами між вимогами абстракції системи та конкретними реалізаціями, даючи змогу коду адаптуватися до оточення, зберігаючи цілісність задуму розробника. У такий спосіб реалізується ідея

розділення абстракції та реалізації, що дає змогу додатку залишатися собою, змінюючи лише зовнішній вигляд під вимоги платформи. Саме так працює патерн *Bridge*, де інтерфейс для роботи з графікою може мати одну абстракцію для візуалізації кнопок, але різні реалізації під Windows, macOS або мобільний WebView. Цей ефект досягається в Java, коли фреймворки на кшталт libGDX використовують єдиний API для рендерингу, делегуючи низькорівневі виклики OpenGL (на ПК) або GLES (на Android), не зачіпаючи ігрову логіку [18].

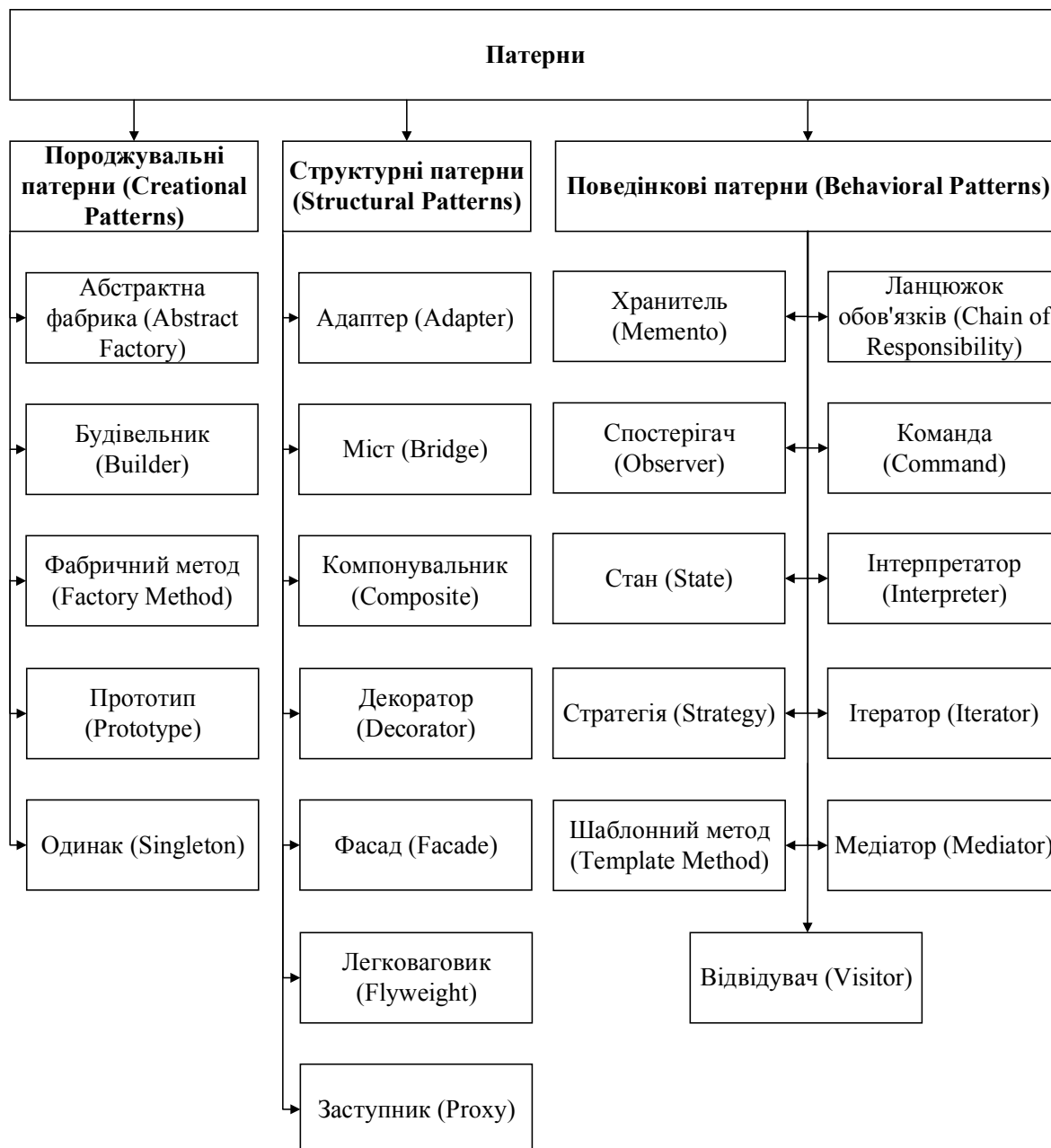


Рисунок 2 – Типи та різновиди патернів

Джерело: розроблено на основі [17]

Іншим важливим аспектом реалізації патернів є динамічна поведінка. Патерн *Strategy* упаковує платформи-специфічні алгоритми у взаємозамінні модулі, які можна «вбудувати» безпосередньо в *runtime*-середовище. Наведемо приклад. Мережева

взаємодія може використовувати різні протоколи шифрування залежно від обмежень платформи: TLS 1.3 для десктопа і спрощений алгоритм для IoT-пристроїв з обмеженими ресурсами. Усе це приховується єдиним методом *sendSecureData()*, а вибір стратегії здійснюється через конфігурацію або автоматичне визначення середовища виконання. Очевидно, що в Java це особливо зручно, завдяки інтерфейсам і впровадженню залежностей, які дають змогу «збирати» застосунок із рішень, що підходять для конкретного контексту.

Іноді під час мультиплатформної адаптації потрібна трансформація даних між контекстами додатків. Для вирішення цього завдання використовується патерн *Adapter* як універсальний перекладач. Наприклад, мобільний застосунок може отримувати геолокаційні дані через Google Maps API на Android і CoreLocation на iOS, але представляти їх у єдиному форматі для внутрішньої логіки. У Java подібне реалізується через обгортки над нативними бібліотеками, де *Adapter* приховує відмінності в JSON-структурах або системних викликах, перетворюючи їх на стандартизовані об'єкти.

Сила патернів полягає у здатності створювати екосистеми абстракцій. Наприклад, патерн *Factory* може генерувати екземпляри класів, специфічних для платформи, але робить це через єдину точку входу. Як приклад можна навести сервіс для роботи з повідомленнями: на десктопі він використовує системний трей, на мобільному пристрої - *Push*-сервіси, а у веб-версії - браузерні API. *Factory*, аналізуючи оточення, створює потрібну реалізацію, але для решти коду всі вони виглядають як єдиний інтерфейс *NotificationService*. У Java такі методи *Factory* часто поєднуються з *Reflection* або *ServiceLoader*, щоб динамічно підвантажувати реалізації без жорстких залежностей.

Як приклад наведемо фрагмент короткого лістингу використання патерну *Factory Method Pattern* для побудови класів Java для парсингу різних XML-документів [17]:

```
package com.javacodegeeks.patterns.factorymethodpattern;
    public interface XMLParser {
        public String parse(); }

    public class ErrorXMLParser implements XMLParser {
        @Override
        public String parse() {
            System.out.println("Parsing error XML...");
            return "Error XML Message"; }
    }

    public class FeedbackXML implements XMLParser {
        @Override
        public String parse() {
            System.out.println("Parsing feedback XML...");
            return "Feedback XML Message"; }
    }

    public class OrderXMLParser implements XMLParser {
        @Override
        public String parse() {
            System.out.println("Parsing order XML...");
            return "Order XML Message"; }
    }

    public class ResponseXMLParser implements XMLParser {
        @Override
        public String parse() {
            System.out.println("Parsing response XML...");
            return "Response XML Message"; }
    }
```

```
public abstract class DisplayService {
    public void display(){
        XMLParser parser = getParser();
        String msg = parser.parse();
        System.out.println(msg); }

    protected abstract XMLParser getParser();
}

public class ErrorXMLDisplayService extends DisplayService {
    @Override
    public XMLParser getParser() {
        return new ErrorXMLParser(); }
}

public class FeedbackXMLDisplayService extends DisplayService {
    @Override
    public XMLParser getParser() {
        return new FeedbackXML(); }
}

public class OrderXMLDisplayService extends DisplayService {
    @Override
    public XMLParser getParser() {
        return new OrderXMLParser(); }
}

public class ResponseXMLDisplayService extends DisplayService {
    @Override
    public XMLParser getParser() {
        return new ResponseXMLParser(); }
}
```

Розробнику необхідно уникати ілюзії універсальності, коли абстракції стають занадто «товстими», втрачаючи зв'язок із реальністю платформ. Патерн *Abstract Factory* вирішує цю проблему, групуючи логічно пов'язані компоненти. Наприклад, створення UI-елементів для різних платформ вимагає узгоджених стилів: кнопка, чекбокс і меню повинні виглядати як частина однієї екосистеми. Фабрика для Android генерує *Material Design*-компоненти, а для iOS - *Cupertino*-стиль, але гарантує, що всі елементи інтерфейсу поєднуюватимуться між собою. У JavaFX це реалізується через *skins* і CSS-стилізацію, де *Factory* керує застосуванням тем залежно від ОС.

Висновки. Аналіз еволюції об'єктно-орієнтованої парадигми в патернах мови Java показав, що принципи ООП (інкапсуляція платформи-залежної логіки та поліморфізм для єдиного інтерфейсу) є ключовими для створення гнучких мультиплатформних програмних систем. Вони дають змогу розділити абстракцію та реалізацію, мінімізуючи дублювання коду. При цьому JVM залишається фундаментом кросплатформності Java. Сучасні концепції та інструменти додатково розширюють її можливості, забезпечуючи інтеграцію з хмарними середовищами, IoT і нативними платформами. Зі свого боку, модульність і компіляція в нативний код відкривають нові можливості для подальшої оптимізації.

Використання патернів формалізує підходи до мультиплатформної адаптації, перетворюючи різноманітні реалізації на узгоджені модулі. Це дає можливість балансувати між універсальністю та платформи-специфічною оптимізацією, знижуючи вартість підтримки.

Незважаючи на перераховані позитивні ефекти, кросплатформна і патерно-орієнтована розробка на Java стикається з певними проблемами компромісу між продуктивністю JVM і нативною швидкістю, складністю інтеграції з унікальними API

мобільних і IoT-пристроїв, ризиком надлишкової абстракції, яка призводить до ускладнення архітектури. Але, безсумнівно, розвиток гібридних парадигм і фреймворків забезпечує подальшу еволюцію і стійке зростання ефективності кросплатформного підходу Java.

Список літератури

1. What Gives Java its Write Once Run Anywhere Nature? *Itvedant.com*. URL: <https://www.itvedant.com/blog/java-write-once-run-anywhere> (date of access: 10.02.2025).
2. Chin S., Vos J., Weaver J. *The Definitive Guide to Modern Java Clients with JavaFX*. Berkeley, CA : Apress, 2024. 626 с. DOI: 10.1007/979-8-8688-0998-9.
3. David J. Eck. *Introduction to Programming Using Java, Version 9, Swing Edition Series*. New York : Hobart and William Smith Colleges, 2022.
4. Pinto C. M., Coutinho C. From Native to Cross-platform Hybrid Development. *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, м. Funchal - Madeira, Portugal, 25–27 верес. 2018 р. 2018. DOI: 10.1109/is.2018.8710545.
5. Comparative analysis of cross-platform development methodologies: a comprehensive study / R. Jangassiyev та ін. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2024. Т. 23, № 1. С. 108. DOI: 10.12928/telkomnika.v23i1.26331.
6. Hiwale P. R. Review On Cross-Platform Mobile Application Development. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022. Т. 10, № 1. С. 1433–1439. DOI: 10.22214/ijraset.2022.40004.
7. You D., Hu M. A Comparative Study of Cross-platform Mobile Application Development. *12th Annual Conference of Computing and Information Technology Research and Education*, New Zealand. 2021.
8. Evaluating Kotlin Multiplatform: Superior cross-platform development / A. Punia та ін. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4836587.
9. Performance Study of Kotlin and Java Program Considering Bytecode Instructions and JVM JIT Compiler / A. Sonoyama та ін. *2021 Ninth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)*, м. Matsue, Japan, 23–26 листоп. 2021 р. 2021. DOI: 10.1109/candarw53999.2021.00028.
10. Nagy R. Simplifying Application Development with Kotlin Multiplatform Mobile: Write robust native applications for iOS and Android efficiently. Birmingham : Packt Publishing, 2022. 184 с.
11. Java NIO. *Oracle.com*. URL: <https://docs.oracle.com/en/java/javase/22/core/java-nio.html> (дата звернення: 12.02.2025).
12. Spring Boot. *Spring.io*. URL: <https://spring.io/projects/spring-boot> (дата звернення: 12.02.2025).
13. Java Dependency Injection. *Digitalocean.com*. URL: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/java-dependency-injection-design-pattern-example-tutorial> (дата звернення: 14.02.2025).
14. GraalVM. *Graalvm.org*. URL: <https://www.graalvm.org/> (дата звернення: 14.02.2025).
15. Apache Commons. *Commons.apache.org*. URL: commons.apache.org (дата звернення: 15.02.2025).
16. Google Guava. *Github.com*. URL: <https://github.com/google/guava> (дата звернення: 15.02.2025).
17. Joshi R. *Java Design Patterns*. Kesariani : Exelixis Media, 2015. 173 с.
18. libGDX. *Libgdx.com*. URL: <https://libgdx.com/> (дата звернення: 16.02.2025).

References

1. Itvedant.com. (n.d.). *What Gives Java its Write Once Run Anywhere Nature?* Retrieved February 10, 2025, from <https://www.itvedant.com/blog/java-write-once-run-anywhere>
2. Chin, S., Vos, J., & Weaver, J. (2024). *The Definitive Guide to Modern Java Clients with JavaFX*. Berkeley, CA: Apress. doi:10.1007/979-8-8688-0998-9
3. Eck, D. J. (2022). *Introduction to Programming Using Java, Version 9, Swing Edition Series*. New York: Hobart and William Smith Colleges.
4. Pinto, C. M., & Coutinho, C. (2018). From Native to Cross-platform Hybrid Development. In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*. IEEE. doi:10.1109/is.2018.8710545
5. Jangassiyev, R., Umarova, Z., Ussenova, A., Makhanova, Z., Zhumatayev, N., Amirov, M., & Koishibekova, G. (2024). Comparative analysis of cross-platform development methodologies: a comprehensive study. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 23(1), 108. doi:10.12928/telkomnika.v23i1.26331.
6. Hiwale, P. R. (2022). Review On Cross-Platform Mobile Application Development. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(1), 1433–1439. doi:10.22214/ijraset.2022.40004.

7. You, D., & Hu, M. (2021). A Comparative Study of Cross-platform Mobile Application Development. In *12th Annual Conference of Computing and Information Technology Research and Education*.
8. Punia, A., Singh, A., Goyal, A., & Arya, A. (2024). Evaluating Kotlin Multiplatform: Superior cross-platform development. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.4836587
9. Sonoyama, A., Kamiyama, T., Oguchi, M., & Yamaguchi, S. (2021). Performance Study of Kotlin and Java Program Considering Bytecode Instructions and JVM JIT Compiler. In *2021 Ninth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)*. IEEE. doi:10.1109/candarw53999.2021.00028
10. Nagy, R. (2022). *Simplifying Application Development with Kotlin Multiplatform Mobile: Write robust native applications for iOS and Android efficiently*. Birmingham: Packt Publishing.
11. Oracle. (n.d.). *Java NIO*. Retrieved February 12, 2025, from <https://docs.oracle.com/en/java/javase/22/core/java-nio.html>
12. Spring Boot. (n.d.). Retrieved February 12, 2025, from <https://spring.io/projects/spring-boot>
13. Java Dependency Injection. (n.d.). *DigitalOcean*. Retrieved February 14, 2025, from www.digitalocean.com/community/tutorials/java-dependency-injection-design-pattern-example-tutorial
14. GraalVM. (n.d.). Retrieved February 14, 2025, from <https://www.graalvm.org/>
15. Apache Commons. (n.d.). Retrieved February 15, 2025, from <https://commons.apache.org/>
16. Google. (n.d.). *Guava*. GitHub. Retrieved February 15, 2025, from <https://github.com/google/guava>
17. Joshi, R. (2015). *Java Design Patterns*. Exelixis Media.
18. libGDX. (n.d.). Retrieved February 16, 2025, from <https://libgdx.com/>.

Ihor Kotov, Prof., DSc., **Dmitriy Shvets**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nadia Karabut**
Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Analyzing the Evolution of Object-Oriented Paradigm in Java Language Patterns for Multiplatform Environments

Research focused on the evolution of the object-oriented paradigm in the context of Java language pattern development for cross-platform environments. It centralizes on analyzing the evolution of the object-oriented paradigm in the context of developing Java language patterns for cross-platform environments. Emphasis is placed on how changes in architectural approaches, driven by cross-platform requirements, have influenced the transformation of the object-oriented paradigm — from classical principles of encapsulation and polymorphism to modern hybrid solutions. The work aims to identify the connection between the adaptation of Java tools and the increasing relevance of patterns that ensure code compatibility across various platforms.

The paper traces the evolutionary path of the object-oriented paradigm in Java, starting from the WORA era, where the Java Virtual Machine (JVM) served as the primary mechanism for platform abstraction, to modern approaches combining native compilation with flexible architectural patterns. Examples such as JavaFX and Spring Boot demonstrate how the encapsulation of platform-dependent details and polymorphism have evolved into tools for creating universal interfaces that adapt to mobile, desktop, and cloud environments.

The role of design patterns in cross-platform development is examined in detail. Patterns are considered dynamic mechanisms that evolved alongside Java itself. Particular attention is paid to challenges such as increasing architectural complexity when integrating with native APIs or the performance limitations of the JVM compared to compiled solutions. It is shown how modularity helps overcome these limitations while preserving the advantages of the object-oriented paradigm.

An analysis of the evolution of the object-oriented paradigm in Java confirms that its principles — encapsulation of platform-dependent logic and polymorphism for a unified interface — remain the foundation for creating flexible cross-platform systems. The JVM is gradually supplemented with tools providing access to cloud environments, IoT, and native optimization. Design patterns evolve from classical templates into adaptive mechanisms that balance universality and platform specificity. Modern challenges, particularly the trade-off between JVM performance and native solutions and integration with highly specialized APIs, demand a more profound synthesis of object-oriented paradigms with new approaches. The development of hybrid paradigms and frameworks shapes the future of Java, where architectural flexibility allows for overcoming technological constraints while maintaining the language's relevance in a fragmented digital ecosystem.

abstraction, adaptation, interface, infrastructure, class, multiplatform, paradigm, pattern, application, framework

Одержано (Received) 28.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 07.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

Ю. І. Підлісний*Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна**e-mail: ypodlesny@ukr.net*

Шляхи підвищення конфіденційності в мережах інтернету речей

У статті представлено результати огляду існуючих найновітніші і найактуальніші системи захисту для мереж IoT, їх переваги та недоліки. Основну увагу приділено методам захисту даних на рівні пристроїв, мережевої інфраструктури та хмарних сервісів. Серед можливих шляхів підвищення конфіденційності розглядаються застосування шифрування, механізмів аутентифікації, впровадження блокчейн-технологій, штучного інтелекту та машинного навчання. Висновки підкреслюють важливість інтеграції багаторівневих стратегій захисту, адаптованих до специфіки мереж IoT, для забезпечення високого рівня конфіденційності та довіри до систем Інтернету речей. Мета статті - комплексне висвітлення і аналіз сучасних викликів, загроз та проблем конфіденційності та безпеки в мережах Інтернету речей (IoT), а також вивчення передових методів захисту чутливої інформації. Стаття також спрямована на формування уявлення про актуальність питань приватності для користувачів IoT, окреслення можливих підходів до вирішення існуючих проблем і підвищення обізнаності щодо впливу технологій на безпеку даних у глобальній IoT-інфраструктурі.

IoT, мережа IoT, штучний інтелект, машинне навчання, безпека інформації

Постановка проблеми. З розвитком Інтернету речей виникає проблема забезпечення конфіденційності даних, що передаються між пристроями та зберігаються в системах. Багато IoT-пристроїв мають обмежені обчислювальні ресурси, що ускладнює впровадження стандартних методів захисту. Крім того, централізовані моделі управління даними часто стають мішенню для атак, що призводить до витоку конфіденційної інформації. Законодавчі ініціативи, такі як GDPR[1], CCPA[2] та інші міжнародні нормативні акти, вимагають впровадження ефективних заходів захисту персональних даних у IoT-системах. Це підкреслює необхідність у розробці нових підходів та технологій, які б дозволили ефективно захищати дані в умовах обмежених ресурсів та розподіленої архітектури IoT-систем, включаючи інноваційні криптографічні механізми, децентралізовані технології та політику мінімізації збору даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення конфіденційності в мережах Інтернету речей (IoT) є важливою темою сучасних досліджень. Так у систематичному огляді [3] досліджено підходи до створення персональних сховищ даних, які дозволяють користувачам контролювати свої дані в IoT-середовищах. Такі сховища забезпечують централізоване управління даними та підвищують конфіденційність, надаючи користувачам можливість визначати, які дані збираються та як вони використовуються. У статті [4] проведено систематичний огляд досліджень, присвячених шаблонам та архітектурам безпеки для IoT. Автори підкреслюють важливість розробки стандартизованих підходів до безпеки та конфіденційності, які можуть бути впроваджені на різних рівнях IoT-систем для забезпечення захисту даних. Технології, які підвищують конфіденційність в IoT, запропоновано у [5], а саме: анонімізацію даних, шифрування та децентралізовані моделі зберігання.

У статті [6] проведено детальний аналіз поточних викликів у сфері безпеки та конфіденційності Інтернету речей (IoT). Автори розглядають загрози на різних рівнях архітектури IoT та пропонують можливі рішення для їх усунення, підкреслюючи

важливість комплексного підходу до забезпечення конфіденційності. У [7] автори пропонують використовувати блокчейн-технологій для підвищення конфіденційності в IoT: «блокчейн може забезпечити децентралізоване управління даними та зменшити ризики несанкціонованого доступу, надаючи прозорість та контроль над транзакціями».

Підсумовуючи, можна зазначити, що ці дослідження підкреслюють важливість розробки та впровадження нових технологій і підходів для забезпечення конфіденційності в мережах Інтернету речей. Використання персональних сховищ даних, стандартизованих архітектур безпеки, технологій підвищення конфіденційності та блокчейн може сприяти захисту особистої інформації користувачів у сучасних IoT-системах. Дослідники відзначають, що IoT-пристрої стають ключовим елементом побудови «цифрового портрету» людини [9], а це підвищує ризики витоку даних і зловживань з боку зловмисників або комерційних структур. У дослідженнях звертається увага на те, що в сучасних умовах недостатньо тільки захистити сам пристрій - необхідно контролювати весь ланцюг обробки даних, включаючи зберігання і передачу інформації.

Незважаючи на активацію досліджень безпеки і конфіденційності IoT в останні роки, існує ряд недосліджених проблем. Більшість досліджень зосереджується на загальних питаннях захисту даних, але не всі аспекти конфіденційності обробки даних у різних типах IoT-систем детально вивчені. Потребують значної адаптації криптографічні алгоритми для пристроїв з обмеженими ресурсами, є нагальна потреба в розробці новітніх методів шифрування без значного впливу на продуктивність пристроїв. Виникає питання, що до розробки безпечної комунікації в мережах IoT, не вирішена проблема масштабованості при використуванні децентралізованих технологій для захисту даних (наприклад блокчейн). Брак єдиних стандартів і нормативних актів створює розриви в системі захисту даних.

Постановка завдання. Провести аналіз основних загроз конфіденційності в IoT-мережах, оцінити існуючі методи захисту, а також визначення перспективних напрямів для підвищення рівня безпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: дослідити основні загрози конфіденційності в IoT-мережах; проаналізувати існуючі методи забезпечення конфіденційності в IoT; проаналізувати застосування технологій шифрування та анонімності для захисту даних; оцінити підходи до конфіденційності з урахуванням обмежених ресурсів IoT-пристроїв; визначити перспективні напрями розвитку технологій захисту конфіденційності в IoT.

Виклад основного матеріалу. Вперше поняття "інтернет речей" (IoT, Internet-of-Things) було застосовано у 1999 році, коли компанія Procter&Gamble створила мережу пристроїв, що були здатні обмінюватися інформацією без втручання людини. Близько 10 років термін не набував широкого розповсюдження і лише наприкінці нульових років до нього прийшла популярність завдяки розвитку нових сенсорів та засобів зв'язку. З середини 2010-х років (трохи більше ніж п'ять років від старту масового застосування) почалося вибухове експоненціальне зростання кількості IoT, яке не припиняється й нині (мова вже йде про 15 мільярдів пристроїв). З тих пір IoT-пристрої впроваджуються практично в усі аспекти життя людини: промисловість, охорону здоров'я, транспорт та звичайні "домашні господарства" (розумні кондиціонери, телевізори, електромобілі тощо).

Розумні пристрої дали людині безліч переваг, такі як зручність, швидкість ухвалення рішень, доступ до різних даних і параметрів і головне можливість швидко отримувати й опрацьовувати різну інформацію (про здоров'я, про дорожню ситуацію, про забруднення повітря тощо).

Є і зворотний бік таких інновацій, а саме пристрої IoT отримують і аналізують інформацію про практично про всі аспекти людського життя. Вони відстежують

геолокацію людини в реальному часі, мають доступ до показників її здоров'я, знають про вподобання в музиці, їжі та навіть про захоплення і хобі. Ця інформація дозволяє створювати "цифровий портрет" людини, що відображає її поведінку, звички, здоров'я та особисті переваги, і є критичною для забезпечення конфіденційності та безпеки в IoT-середовищі.

Однак багато IoT-пристроїв виготовляються з відносно слабкими обчислювальними ресурсами та мають обмежену операційну систему. Багато виробників не приділяли достатньої уваги кібербезпеці своїх продуктів (це питання ніколи не було на "чільному місці" - рахувалося, що такі пристрої працюють у середовищі, де це "нібито не так важливо"). А це призвело до того, що IoT-пристрої часто мають вразливості у програмному забезпеченні, які можуть бути використані для атак [10, стр. 76, 146-164]. IoT-пристрої збирають досить великі обсяги особистої і конфіденційної інформації. Недостатня захищеність цих даних може призвести до порушення приватності користувачів та потенційних фінансових або особистих втрат. Більш того, у випадку компрометації безпеки систем IoT, можуть виникнути серйозні загрози для фізичної безпеки. Наприклад, сучасні автомобілі стали частиною всесвіту Інтернет речей (концепція Connected Car) і отримання можливості злочинцю керувати дистанційно його системами може привести, в залежності від цілей зловмисника, до непередбачуваних наслідків для життя та здоров'я водія і оточуючих його людей.

Природно, що масштабність та розповсюдженість Інтернет речей створює великий потенціал для кіберзлочинців - впливати на широкий спектр систем. Як правило, IoT-пристрої інтегруються в загальну мережу (чи то домашня Wi-Fi мережа, чи то велика корпоративна), і якщо один із пристроїв у результаті злому буде скомпрометовано, можна отримати доступ до всієї мережі з усіма пристроями. Тому злочинні елементи можуть використовувати IoT-пристрої для створення ботнетів, здійснення DDoS-атак, зламу даних або навіть фізичного шкоди.

Збереження конфіденційної інформації про людину важливе і для самої індустрії IoT. Насамперед визначення конфіденційності звучить як право людей контролювати збір, використання та розкриття їхньої особистої інформації. Використовуючи це визначення, ми можемо сформулювати основні аспекти щодо важливості конфіденційності у мережах IoT:

- *захист особистої інформації*: кожна людина має право на приватність і її особиста інформація така як дані про здоров'я, фінансові транзакції, місцезнаходження або інші особисті дані не повинна бути доступна без її згоди. Порушення конфіденційності може призвести до крадіжки особистих даних або шахрайства.

- *захист від зловживання*: дані, які збирають IoT-пристрої, можуть використовуватися для зловживань, таких як відстеження або маніпуляція, якщо вони потраплять до зловмисників.

- *захист від дискримінації*: якщо особисті дані людини (наприклад, про здоров'я або політичні переконання) будуть відомі широкому загалу або недобросовісним організаціям, це може призвести до дискримінації або утисків.

- *цифрова репутація*: особисті дані формують цифровий слід, який впливає на репутацію людини в інтернеті. Незахищеність даних може зруйнувати довіру до людини або компанії.

- *психологічна безпека*: люди мають відчувати себе в безпеці та комфортно, знаючи, що їхня приватність зберігається. Постійне відчуття спостереження може створювати стрес та незадоволення.

- *право на самовизначення*: конфіденційність дає людині можливість контролювати, як і коли її інформація буде використовуватись, що забезпечує більше контролю над власним життям.

Якщо довіру до пристроїв IoT, через витік конфіденційної інформації буде підірвано, індустрія не зможе розвиватися і впроваджувати справді інноваційні та проривні технології. Тобто у нас фактично є *дилема і головна проблема*: з одного боку - через розмаїття пристроїв IoT (за призначенням, за принципами роботи тощо) не завжди є можливість забезпечити стандартні підходи до забезпечення безпеки, а з іншого боку - виробники не можуть отримати достатньо прибутку через недовіру та запитання щодо безпеки розумних пристроїв, щоб впровадити більш інноваційні підходи.

Дослідження конфіденційності в Інтернет речах полягає у тому, що стрімке зростання кількості IoT-пристроїв супроводжується значними загрозами для безпеки та приватності користувачів [11]. В той час, як ці пристрої забезпечують нові можливості для автоматизації, комфорту і ефективності, вони також збирають величезні обсяги чутливої інформації, включаючи дані про місцезнаходження, поведінку, медичні показники, відео та аудіо. У зв'язку з цим виникають наступні загрози:

- *вразливість IoT-пристроїв до кібератак*: через обмеженість апаратних і програмних ресурсів більшість IoT-пристроїв не мають достатнього рівня захисту. Це робить їх вразливими до атак типу "людина посередині", перехоплення даних, шкідливих програм, зломів і, як наслідок, зловмисники можуть отримати доступ до приватної інформації користувачів.

- *несанкціонований збір і використання даних*: багато IoT-пристроїв без відома користувачів збирають дані, які можуть бути використані для побудови цифрового профілю особи (дані про звички, уподобання, маршрути переміщень, стан здоров'я тощо). Без належних механізмів захисту ці дані можуть бути передані третім особам або використані для комерційних чи злочинних цілей.

- *відсутність єдиних стандартів і регулювання*: існує брак уніфікованих стандартів захисту даних та конфіденційності в IoT-системах. Різні виробники можуть використовувати різні протоколи та технології, що ускладнює забезпечення єдиної системи захисту. Крім того, правове регулювання в різних країнах відстає від темпів розвитку технологій, що робить захист даних у глобальному масштабі неповноцінним.

- *надійне управління даними*: проблемою є й те, хто несе відповідальність за безпеку даних. IoT-пристрої часто використовують хмарні сервіси для зберігання та обробки даних. У випадку витоку даних або атаки виникають питання щодо відповідальності за ці інциденти.

- *низька обізнаність користувачів*: багато користувачів IoT-пристроїв не усвідомлюють рівень загроз, пов'язаних із конфіденційністю та захистом даних. Вони часто не знають, як правильно налаштувати пристрої або застосувати необхідні заходи безпеки.

Як вже було зазначено вище, пристрої IoT охоплюють все більше сфер людського життя, аналізують і збирають великий обсяг інформації, тому і розробляються новітні методи захисту чутливих даних і системи захисту анонімності людини (аномайзери). Для пристроїв IoT сьогодення характерно об'єднання останніх у мережі IoT (рис.1).

Проаналізуємо існуючі найновітніші і найактуальніші системи захисту для мереж IoT, їх переваги та недоліки.

1. Штучний інтелект та машинне навчання для виявлення аномалій є однією з найбільш ефективних та інноваційних технологій захисту мереж Інтернету речей. Ці методи використовуються для автоматизованого аналізу великих обсягів даних, які генеруються IoT-пристроями, та ідентифікації підозрілої або нехарактерної поведінки. Машинне навчання (МН) створює моделі, які навчаються на попередньо

отриманих даних (історичних даних), які розпізнають закономірності та виявляють аномалії. Штучний інтелект (ШІ) здатний самостійно аналізувати дані в реальному часі, порівнюючи їх з еталонними моделями для виявлення нетипової поведінки в мережі. Аномалії — це відхилення від стандартної поведінки IoT-пристроїв, які можуть свідчити про кібератаку або технічну несправність [13].

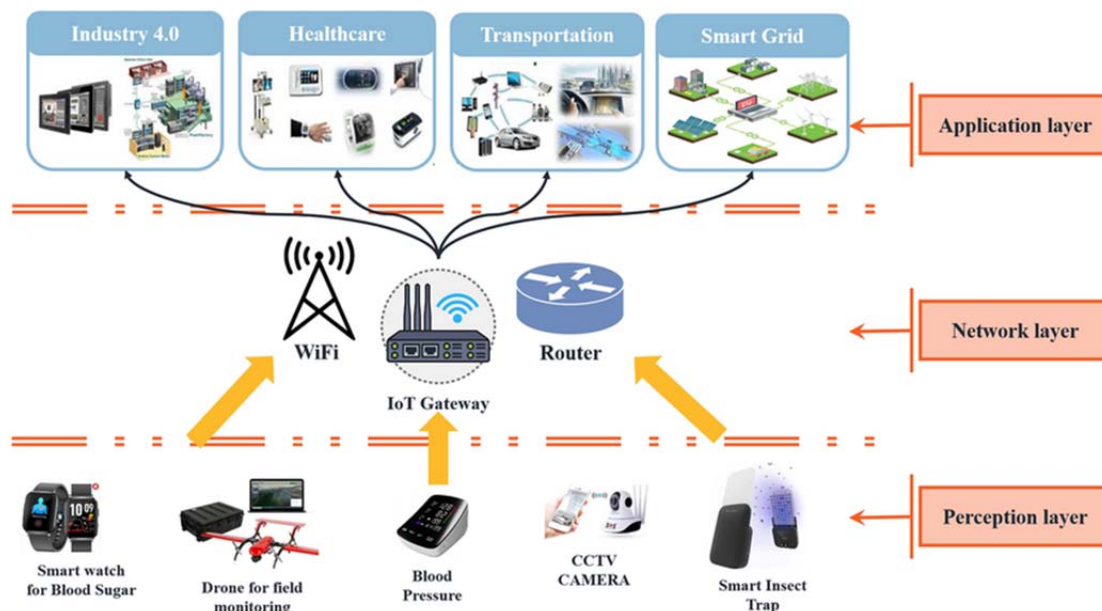


Рисунок 1 - Сучасна мережа пристроїв IoT

Джерело: розроблено на основі [12]

Переваги застосування ШІ та МН для виявлення аномалій: швидкість виявлення (автоматизовані алгоритми здатні виявляти аномалії в реальному часі, що мінімізує час реакції на потенційні загрози); виявлення нових типів атак (на відміну від традиційних методів на основі сигнатур, ШІ та МН здатні виявляти невідомі або нові види атак, які ще не були занесені в бази даних кіберзагроз); адаптивність (моделі МН можуть адаптуватися до нових умов, що дозволяє системам безпеки еволюціонувати разом із розвитком загроз); масштабованість (ці системи можуть обробляти величезні обсяги даних від багатьох пристроїв одночасно, що робить їх ідеальними для масштабних IoT-мереж). Недоліки застосування ШІ та МН: помилкові спрацювання (неправильно налаштовані моделі можуть призводити до великої кількості хибних спрацювань, що може перевантажити систему безпеки); обчислювальні ресурси (алгоритми ШІ та МН потребують значних обчислювальних потужностей, що може бути проблемою для малопотужних IoT-пристроїв); потреба у високоякісних даних (для налаштування моделей потрібні великі обсяги даних - якщо дані є неповними або нерелевантними, ефективність моделей може бути низькою).

- **Блокчейн для захисту даних та транзакцій** використовує децентралізовану базу даних для зберігання інформації, забезпечуючи при цьому високий рівень безпеки, прозорості та надійності. Блокчейн може бути використаний для безпечного зберігання та обміну даними між IoT-пристроями, забезпечуючи їх автентичність і цілісність [14]. Переваги застосування: висока безпека (завдяки децентралізованій природі та криптографічним методам); прозорість і відстежуваність (дозволяє учасникам мережі перевіряти дані в будь-який час); скорочення витрат (зменшує витрати на обробку і зберігання даних); недоліки – складність інтеграції (впровадження блокчейн-технологій може бути складним і вимагати великих зусиль), проблеми масштабованості (деякі

блокчейн-системи можуть стикатися з обмеженнями в обробці великої кількості транзакцій), правові та регуляторні питання (блокчейн ще не регулюється чітко в багатьох країнах, що може створювати правові проблеми).

- **Диференціальна конфіденційність** додає "шум" до даних, щоб приховати інформацію про окремих осіб або IoT-пристрої, водночас зберігаючи корисність загальних аналітичних даних. Вона дозволяє зберігати конфіденційність інформації про індивідуумів у наборі даних, забезпечуючи при цьому можливість отримувати статистичні висновки без розкриття особистої інформації [15]. Переваги: забезпечення конфіденційності (захищає особисті дані користувачів від несанкціонованого доступу); збереження аналітичної цінності (дозволяє отримувати корисну інформацію з даних, не розкриваючи особисту інформацію). Недоліки – втрата точності (додавання шуму може знизити точність аналізу), складність впровадження (реалізація диференціальної конфіденційності може вимагати значних зусиль у розробці)

- **Гомоморфне шифрування** дозволяє виконувати обчислення над зашифрованими даними без необхідності їх дешифрування. Це означає, що навіть оброблені дані залишаються захищеними [16]. Переваги: конфіденційність даних (гомоморфне шифрування дозволяє захищати чутливу інформацію, що збирається IoT-пристроями ,наприклад, дані про здоров'я, фінансову інформацію); обробка даних на сторонніх серверах (дозволяє виконувати обробку даних на хмарних серверах без необхідності їх розшифровувати, що знижує ризики витоку інформації); захист даних під час передачі (дослідження показують, що дані, які передаються між IoT-пристроями, можуть бути зашифровані, що запобігає їх перехопленню). Недоліки: висока обчислювальна складність (виконання обчислень над зашифрованими даними потребує значних обчислювальних ресурсів, що може бути проблемою для IoT-пристроїв з обмеженою потужністю); часова затримка (гомоморфне шифрування може викликати затримки в обробці даних через високу складність обчислень).

- **Zero-Trust архітектура** означає, що жоден пристрій чи користувач не довіряється за замовчуванням, навіть якщо він знаходиться у внутрішній мережі. Усі доступи повинні бути постійно перевірені та підтвержені. У контексті Інтернету речей ця архітектура стає все більш важливою через зростаючу кількість підключених пристроїв, які можуть бути вразливими до атак [17]. Переваги: зменшення ризиків (Zero-Trust допомагає знизити ймовірність успішних атак, оскільки кожен доступ перевіряється); гнучкість (архітектура дозволяє безпечно інтегрувати нові пристрої та технології без необхідності переглядати всю мережу), покращення видимості (постійний моніторинг та аналіз допомагають у виявленні аномалій і підозрілої активності). Недоліки: складність налаштування (впровадження Zero-Trust вимагає детального аналізу всіх пристроїв і систем, що може бути складним); обмеження ресурсів (IoT-пристрої часто мають обмежені ресурси, що може ускладнити реалізацію вимог Zero-Trust),

- **Edge Computing (крайові обчислення) із безпекою на рівні пристрою** дозволяє обробляти дані безпосередньо на пристроях або поблизу них, замість відправлення всіх даних до централізованого хмари або серверів. Це має особливе значення для Інтернету речей, де швидкість обробки даних і безпека є критично важливими. Переваги: зниження затримок (Edge Computing дозволяє швидко реагувати на події, що покращує загальну ефективність системи); покращення безпеки (обробка даних на місці зменшує ризики, пов'язані з передачами даних через інтернет); зменшення навантаження на мережу (зменшення обсягу даних, які передаються до централізованих серверів, дозволяє економити ресурси). Недоліки: диверсифікація пристроїв (існує велика кількість різноманітних пристроїв в IoT, що ускладнює

забезпечення однорідного рівня безпеки); обмежені ресурси (багато IoT-пристроїв мають обмежені обчислювальні потужності, що може ускладнювати реалізацію складних механізмів безпеки); вразливість до фізичних атак (пристрої можуть бути вразливими до фізичного доступу, що може призвести до компрометації даних).

- **Контроль автентичності даних (Data Integrity Verification)** є критично важливою складовою, що забезпечує точність, повноту та захищеність даних, які збираються та передаються між пристроями. Наразі основні методи контролю це *хешування* (використання хеш-функцій (наприклад, SHA-256) для створення унікальних ідентифікаторів даних, це дозволяє перевіряти, чи дані були змінені, порівнюючи хеш значення), *цифрові підписи, контроль доступу, аудит і моніторинг, протоколи безпеки* (використання безпечних протоколів передачі даних, таких як TLS/SSL, для шифрування даних під час передачі, це захищає дані від перехоплення і модифікацій) [18-19]. Недоліки: обмежені ресурси, різноманітність пристроїв (існує велика кількість різних типів пристроїв в IoT, що ускладнює стандартизацію підходів до контролю автентичності даних); складність мережі (IoT-мережі часто є динамічними та розподіленими, що ускладнює відстеження та перевірку автентичності даних у реальному часі [5]).

- **Мультифакторна автентифікація (MFA) для IoT** теж є критично важливою складовою безпеки пристроїв Інтернету речей. Вона дозволяє значно знизити ризики несанкціонованого доступу, забезпечуючи додатковий рівень захисту [20]. Переваги: захист від атак (пристрої IoT часто є мішенню для хакерів через їх вразливість. MFA ускладнює доступ до системи навіть у разі компрометації одного з факторів); зниження ризику несанкціонованого доступу (навіть якщо зловмисник отримує пароль користувача, йому все ще потрібно пройти додаткові етапи автентифікації); захист конфіденційності (MFA допомагає захистити особисті дані користувача, які можуть бути вразливими в разі атаки на IoT пристрої). Недоліки: обмежені ресурси, зручність для користувача (надмірна складність процесу автентифікації може викликати незручності для користувачів, тому важливо знайти баланс між безпекою та зручністю).

Висновки. У процесі дослідження були розглянуті основні загрози конфіденційності в IoT-мережах, а також методи та технології, які можуть забезпечити захист даних в умовах обмежених ресурсів IoT-пристроїв. Результати дозволяють виявити важливі аспекти забезпечення конфіденційності в таких мережах, а також вказують на перспективні напрямки розвитку для покращення безпеки в IoT.

Зокрема, були визначені проблеми з методами аутентифікації та авторизації, вразливості в програмному забезпеченні та недостатній рівень захисту каналів зв'язку, що створюють серйозні загрози для конфіденційності. Крім того, було проаналізовано існуючі методи захисту та виявлено необхідність їх адаптації до специфіки IoT, зокрема з огляду на обмеження по ресурсах пристроїв.

Основні висновки та рекомендації:

1. Дослідження основних загроз конфіденційності в IoT-мережах:

Виявлено, що однією з головних загроз для конфіденційності в IoT є недостатньо надійні методи аутентифікації та авторизації користувачів. Крім того, вразливості в програмному забезпеченні пристроїв, а також незахищеність каналів зв'язку можуть призвести до несанкціонованого доступу до особистих даних.

2. Аналіз існуючих методів забезпечення конфіденційності в IoT:

Існуючі методи, такі як шифрування даних, використання багатофакторної аутентифікації та протоколів безпечної передачі даних (наприклад, TLS), є важливими, але недостатньо ефективними в умовах обмежених ресурсів IoT-пристроїв. Технології

повинні бути адаптовані до специфіки IoT, щоб забезпечити баланс між безпекою та енергоефективністю.

3. Вивчення застосування технологій шифрування та анонімності для захисту даних: Технології шифрування, зокрема симетричні та асиметричні алгоритми, дозволяють ефективно захищати конфіденційність даних в IoT-мережах. Однак високі вимоги до обчислювальних ресурсів вимагають застосування більш легких та адаптованих алгоритмів, таких як гібридне шифрування або постквантові методи.

4. Оцінка підходів до конфіденційності з урахуванням обмежених ресурсів IoT-пристроїв: Призначення IoT-пристроїв із обмеженими ресурсами потребує спеціальних методів, які дозволяють зберігати конфіденційність при мінімальних витратах на обчислення та енергію. Найбільш ефективними є моделі з використанням хмарних платформ для зберігання та обробки великих обсягів даних, що дозволяє знизити навантаження на самі пристрої.

5. Визначення перспективних напрямів розвитку технологій захисту конфіденційності в IoT: Перспективними напрямками розвитку є використання блокчейн-технологій для забезпечення прозорості та надійності даних, а також вдосконалення алгоритмів машинного навчання для виявлення аномалій в мережах IoT. Інші інноваційні підходи включають використання технологій квазі-анонімності для підвищення рівня анонімності користувачів і впровадження інтегрованих систем безпеки на апаратному рівні.

Хоча новітні методи захисту пристроїв IoT постійно вдосконалюються досі залишаються невирішеними проблеми стандартизації їх систем безпеки, актуальність оновлення програмного забезпечення, конфіденційність даних, недостатня обізнаність користувачів, складність інтеграції новітніх технологій.

Список літератури

1. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2016/679 від 27 квітня 2016 року / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_008-16#Text (дата звернення: 15.02.2025).
2. California Consumer Privacy Act (CCPA). March 13, 2024. URL: <https://oag.ca.gov/privacy/ccpa> (дата звернення: 15.02.2025).
3. Pinto G.P., Donta P.K., Dustdar S., Prazeres C. A Systematic Review on Privacy-Aware IoT Personal Data Stores. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 7. 2197. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11014407/> (дата звернення: 10.02.2025).
4. Rajmohan T., Nguyen P.H., Ferry N. A decade of research on patterns and architectures for IoT security. *Cybersecurity*. 2022. Vol. 5. Article No. 2. URL: <https://cybersecurity.springeropen.com/articles/10.1186/s42400-021-00104-7> (дата звернення: 12.02.2025).
5. Ataullah M., Chauhan N. Exploring security and privacy enhancement technologies in the Internet of Things: A comprehensive review. *Security and Privacy*. 2024. Vol. 7, Issue 6. e448. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/spy2.448> (дата звернення: 15.02.2025).
6. Lu Y. Security and Privacy of Internet of Things: A Review of Challenges and Solutions. *Journal of Cyber Security and Mobility*. 2023. Vol. 12, Issue 6. URL: journals.riverpublishers.com/index.php/JCSANDM/article/view/22587/ (дата звернення: 15.02.2025).
7. Abomhara M., Køien G.M. Security and privacy in the Internet of Things: Current status and open issues. 2014 International Conference on Privacy and Security in Mobile Systems (PRISMS). 2014. DOI: 10.1109/PRISMS.2014.6970594. URL: <https://www.researchgate.net/publication/269687360> (дата звернення: 15.02.2025).
8. Pinto G.P., Donta P.K., Dustdar S. A Systematic Review on Privacy-Aware IoT Personal Data Stores. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 7. 2197. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38610408> (дата звернення: 15.02.2025).
9. Ystgaard K.F., Atzori L., Palma D., et al. Review of the theory, principles, and design requirements of human-centric Internet of Things (IoT). *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2023. Vol. 14. P. 2827–2859. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12652-023-04539-3> (дата звернення: 15.02.2025).

10. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L.A., Coen-Portisini A. Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*. 2015. Vol. 76. P. 146–164. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128614003971> (дата звернення: 15.02.2025).
11. Roman R., Zhou J., López J. On the Features and Challenges of Security and Privacy in Distributed Internet of Things. *Computer Networks*. 2013. Vol. 57, Issue 10. P. 2266–2279. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128613000054> (дата звернення: 15.02.2025).
12. Ben Henda N., Msolli A., Hagui I., Helali A. Attack Detection in IoT Network Using Support Vector Machine and Improved Feature Selection Technique. *Journal of Network and Systems Management*. 2024. Vol. 32, No. 4. DOI: 10.1007/s10922-024-09871-3. URL: https://www.researchgate.net/figure/The-conventional-architecture-for-IoT-network_fig1_383984303 (дата звернення: 15.02.2025).
13. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., et al. Network-based Detection of IoT Botnet Attacks Using Deep Autoencoders. *IEEE Pervasive Computing*. 2018. Vol. 17, Issue 3. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8490192> (дата звернення: 15.02.2025).
14. Ul Haque E., Abbasi W., Almogren A., Choi J., et al. Performance enhancement in blockchain-based IoT data sharing using lightweight consensus algorithm. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, Article No. 26561. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-77706-x> (дата звернення: 20.02.2025).
15. Jiang B., Li J., Yue G., Song H. Differential Privacy for Industrial Internet of Things: Opportunities, Applications and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, Issue 13. P. 10430–10451. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.10569> (дата звернення: 20.02.2025).
16. Chauhan K.K., Sanger A.K.S., Verm A. Homomorphic Encryption for Data Security in Cloud Computing. *International Conference on Information Technology (ICIT)*. 2015. DOI: 10.1109/ICIT.2015.39. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7437616> (дата звернення: 20.02.2025).
17. Rose S., Borchert O., Mitchell S., Connelly S. Zero Trust Architecture. *National Institute of Standards and Technology*. 2020. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-207.
18. Alkhonaini M.A., Alenizi F.A., Jazyah Y.H., Lee S. A two-phase spatiotemporal chaos-based protocol for data integrity in IoT. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, Article No. 8629. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-58914-x> (дата звернення: 14.02.2025).
19. Baker A., Technologist P., River W. Maintaining data integrity in Internet of Things applications Arlen Baker, Principal Technologist, Wind River. URL: <https://files.iccmedia.com/pdf/windriver160823.pdf> (дата звернення: 14.02.2025).
20. Amos Z. Multi-Factor Authentication Is Crucial for IoT Security. URL: <https://www.iotforall.com/multi-factor-authentication-is-crucial-for-iot-security> (дата звернення: 19.02.2025).

References

1. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016. (2016). Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved February 15, 2025, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_008-16#Text [in Ukrainian].
2. California Consumer Privacy Act (CCPA). (2024, March 13). Retrieved February 15, 2025, from <https://oag.ca.gov/privacy/ccpa>.
3. Pinto, G. P., Donta, P. K., Dustdar, S., & Prazeres, C. (2024). A systematic review on privacy-aware IoT personal data stores. *Sensors*, 24(7), 2197. Retrieved February 10, 2025, from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11014407/>.
4. Rajmohan, T., Nguyen, P. H., & Ferry, N. (2022). A decade of research on patterns and architectures for IoT security. *Cybersecurity*, 5, Article 2. Retrieved February 12, 2025, from <https://cybersecurity.springeropen.com/articles/10.1186/s42400-021-00104-7>.
5. Ataullah, M., & Chauhan, N. (2024). Exploring security and privacy enhancement technologies in the Internet of Things: A comprehensive review. *Security and Privacy*, 7(6), e448. Retrieved February 15, 2025, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/spy2.448>.
6. Lu, Y. (2023). Security and privacy of Internet of Things: A review of challenges and solutions. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 12(6). Retrieved February 15, 2025, from <https://journals.riverpublishers.com/index.php/JCSANDM/article/view/22587/>.
7. Abomhara, M., & Køien, G. M. (2014). Security and privacy in the Internet of Things: Current status and open issues. *Proceedings of the 2014 International Conference on Privacy and Security in Mobile Systems (PRISMS)*. <https://doi.org/10.1109/PRISMS.2014.6970594>.
8. Pinto, G. P., Donta, P. K., & Dustdar, S. (2024). A systematic review on privacy-aware IoT personal data stores. *Sensors*, 24(7), 2197. Retrieved February 15, 2025, from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38610408>
9. Ystgaard, K. F., Atzori, L., Palma, D., et al. (2023). Review of the theory, principles, and design requirements of human-centric Internet of Things (IoT). *Journal of Ambient Intelligence and Humanized*

- Computing, 14, 2827–2859. Retrieved February 15, 2025, from link.springer.com/article/10.1007/s12652-023-04539-3.
10. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146–164. Retrieved February 15, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128614003971>.
 11. Roman, R., Zhou, J., & López, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed Internet of Things. *Computer Networks*, 57(10), 2266–2279. Retrieved February 15, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128613000054>.
 12. Ben Henda, N., Msolli, A., Hagui, I., & Helali, A. (2024). Attack detection in IoT network using support vector machine and improved feature selection technique. *Journal of Network and Systems Management*, 32(4). <https://doi.org/10.1007/s10922-024-09871-3>.
 13. Meidan, Y., Bohadana, M., Mathov, Y., et al. (2018). Network-based detection of IoT botnet attacks using deep autoencoders. *IEEE Pervasive Computing*, 17(3). Retrieved February 15, 2025, from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8490192>.
 14. Ul-Haque, E., Abbasi, W., Almogren, A., Choi, J., et al. (2024). Performance enhancement in blockchain-based IoT data sharing using lightweight consensus algorithm. *Scientific Reports*, 14, Article 26561. Retrieved February 20, 2025, from <https://www.nature.com/articles/s41598-024-77706-x>.
 15. Jiang, B., Li, J., Yue, G., & Song, H. (2021). Differential privacy for industrial Internet of Things: Opportunities, applications and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(13), 10430–10451. Retrieved February 20, 2025, from <https://arxiv.org/abs/2101.10569>.
 16. Chauhan, K. K., Sanger, A. K. S., & Verm, A. (2015). Homomorphic encryption for data security in cloud computing. *Proceedings of the International Conference on Information Technology (ICIT)*. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.39>.
 17. Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). Zero trust architecture. *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>.
 18. Alkhonaini, M. A., Alenizi, F. A., Jazyah, Y. H., & Lee, S. (2024). A two-phase spatiotemporal chaos-based protocol for data integrity in IoT. *Scientific Reports*, 14, Article 8629. Retrieved February 14, 2025, from <https://www.nature.com/articles/s41598-024-58914-x>.
 19. Baker, A., & River, W. (n.d.). Maintaining data integrity in Internet of Things applications. Retrieved February 14, 2025, from <https://files.iccmmedia.com/pdf/windriver160823.pdf>.
 20. Amos, Z. (n.d.). Multi-factor authentication is crucial for IoT security. Retrieved February 19, 2025, from <https://www.iotforall.com/multi-factor-authentication-is-crucial-for-iot-security>.

Yuriy Pidlisnyi

Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine

Possible Ways to Improve Privacy in IoT Networks

The rapid development of IoT technologies and their integration into everyday life are leading to a significant increase in the amount of data collected, transmitted and processed. This creates significant risks of confidential information leakage, which can have serious consequences for individual users, businesses and government agencies. In addition, the growing number of connected devices and their interaction in global networks increase the vulnerability of systems to cyberattacks, which can lead to unauthorized access to critical data.

The purpose of this article is to analyze the vulnerabilities of the Internet of Things (IoT) and to consider modern methods of detecting and counteracting cyber threats in such networks. The main objectives of the study include: Identification of the main threats and vulnerabilities of IoT networks at different levels of interaction; Analysis of modern attack methods applied to IoT systems and their consequences; Overview and classification of security methods, including cryptographic mechanisms, blockchain solutions, artificial intelligence-based anomaly detection systems, etc; Comparison of the effectiveness of different approaches to cybersecurity of IoT infrastructure and identification of their advantages and disadvantages; Formulating recommendations for the implementation of more reliable mechanisms to protect IoT networks.

Based on the analysis, the article proposes promising approaches to improving the security of IoT infrastructure, which can be used to minimize risks and improve the protection of users' personal information. The results of the study can be useful both for scientists dealing with cybersecurity issues and for practitioners working in the field of development and implementation of IoT solutions.

IoT network, artificial intelligence, machine learning, information security

Одержано (Received) 27.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 07.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.56-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.56-67)

М. С. Продеус, А. О. Нічепорук, доц., канд. техн. наук, **А. С. Каштальян**, доц., канд. техн. наук
Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна
e-mail: mprodeus99@ukr.net, andrey.nicheporuk@gmail.com, yantonina@ukr.net

Система моніторингу, виявлення, реагування та захисту інформації на основі honeypot-файлів

З огляду на зростання кіберзагроз та обмежену ефективність традиційних засобів безпеки, у статті запропоновано систему моніторингу, виявлення, реагування та захисту інформації на основі honeypot-файлів. Запропонований підхід поєднує розподілене розміщення honeypot-файлів, багаторівневий моніторинг і автоматизоване блокування загроз, що дозволяє знизити кількість помилкових спрацювань до 10% та забезпечити реакцію системи із середнім часом відповіді 2 секунди. Розглянуто особливості інтеграції такої системи у корпоративні середовища, виклики її розгортання та можливості масштабування до 50 honeypot-файлів у локальних і хмарних інфраструктурах. Отримані результати демонструють ефективність підходу в ідентифікації та блокуванні вірусів, троянських програм, програм-вимагачів та інших кіберзагроз, що робить його перспективним для посилення захисту корпоративних мереж.

файли-приманки, honeypot, мережева безпека, виявлення загроз, кіберзахист, корпоративні мережі

Постановка проблеми. Для покращення безпеки та захисту інформації корпоративних мереж поряд зі стандартними засобами доцільно використовувати засоби і системи на основі обманних технологій. Як правило це спеціально створені системи, які імітують реальні сервери або пристрої користувачів, щоб привертати увагу хакерів. Їх називають приманками і вони містять фальшиві дані або сервіси, які виглядають привабливо для зловмисників, але не становлять реальної цінності для організації. Основна функція приманок – фіксувати спроби несанкціонованого доступу та аналізувати дії зловмисників [1].

Використання приманок залишається дискусійним питанням у сфері кібербезпеки. Вони приваблюють фахівців своєю простотою впровадження та здатністю вчасно виявляти вторгнення в мережу. Однак проблема виникає, коли організації розглядають приманки як основний засіб виявлення загроз, а не як частину комплексної стратегії захисту.

Одним із видів кіберприманок є приманний файл. Це спеціально створений документ, призначений для виявлення несанкціонованого доступу та моніторингу поведінки потенційних зловмисників. Розміщення такого файлу в системі дозволяє отримувати сповіщення про спроби доступу, що допомагає виявляти загрози безпеці [2]. Приманний файл працює як цифрова пастка. Для звичайних користувачів він залишається непомітним, але привертає увагу кіберзлочинців. Кожна спроба доступу фіксується, що дає змогу відстежувати підозрілу активність і аналізувати потенційні загрози. Це не лише сприяє ранньому виявленню атак, а й дає цінну інформацію про дії зловмисників, що допомагає вдосконалювати механізми кібербезпеки [3].

Ефективність приманок залежить не лише від їхньої правильної конфігурації, а й від стратегічного розташування в мережі. Важливо мінімізувати кількість хибних спрацювань і зробити систему максимально реалістичною, щоб вона залишалася привабливою для кіберзлочинців. Водночас приманки мають бути лише одним із компонентів загальної стратегії кібербезпеки. Для ефективного протистояння атакам, зокрема програмам-вимагачам, необхідно чітко розуміти можливості та обмеження цього інструмента [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні проблема створення

кіберприманок для аналізу зловмисної активності привертає значну увагу в науковій літературі. У дослідженні [5] автори представляють HoneyHive – розподілену систему виявлення загроз, що базується на приманках для IoT. Робота описує підхід до інтеграції систем приманок у середовище Інтернету речей (IoT) для ефективного моніторингу та аналізу потенційних атак. Основна ідея полягає в розгортанні невеликих пристроїв з вбудованими модулями приманок у різних сегментах мережі, що імітують вразливі вузли, які можуть стати цілями атак.

Однією з ключових переваг HoneyHive є її розподілена архітектура, що дозволяє здійснювати моніторинг безпеки мережі в режимі реального часу без необхідності втручання адміністратора. Поєднання легковагових модулів приманок із централізованим аналізом загроз робить цю систему ефективним рішенням для захисту IoT-інфраструктури. Окрему увагу також приділено питанню поширення метаморфних вірусів, проте активне відстеження таких загроз залишається значним викликом.

У роботі [6] автори розробляють концептуальну модель багатокомп'ютерних систем, призначених для підтримки роботи антивірусних приманок та пасток для виявлення зловмисного програмного забезпечення й кібератак у корпоративних мережах. Запропонований підхід спрямований на запобігання та протидію проникненню метаморфних вірусів. Розроблена модель поєднує комбіновані приманки та пастки, а також контролер ухвалення рішень для виявлення та нейтралізації зловмисного програмного забезпечення й кіберзагроз. Крім того, такі системи можуть включати модифіковані операційні середовища, що виконують програми у зміненому режимі з дослідницькою метою. Запропонований метод підвищує ефективність виявлення та запобігання поширенню метаморфних вірусів у корпоративних мережах.

Дослідження [7] пропонує новий підхід до виявлення метаморфних вірусів. Методика складається з двох етапів: на першому етапі здійснюється пошук еквівалентних функціональних блоків на основі статистичної оцінки частоти інструкцій, а на другому – уточнюється вибір еквівалентних блоків і визначаються рівні обфускації.

Результати дослідження свідчать, що запропонований метод ефективно виявляє метаморфні віруси, навіть якщо вони використовують складні техніки обфускації. Це досягається шляхом аналізу відповідностей між функціональними блоками в різних версіях вірусу, що дозволяє ідентифікувати зловмисне програмне забезпечення, незважаючи на його модифікації. У результаті ця методика сприяє підвищенню надійності кібербезпекових систем у боротьбі із сучасними загрозами.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка та оцінка ефективності системи моніторингу, виявлення, реагування та захисту інформації на основі Honeypot-файлів. Особлива увага приділяється тому, наскільки ефективніше вдосконалене рішення мінімізує помилкові спрацьовування та забезпечує оперативне блокування зловмисників у порівнянні з традиційним підходом Canarytokens.

Основні завдання дослідження: 1) проаналізувати традиційний підхід до створення файлів-приманок за допомогою Canarytokens та виокремити його недоліки; 2) запропонувати систему моніторингу, виявлення, реагування та захисту інформації на основі Honeypot-файлів, що заснована на механізмах динамічних файлів honeypot; використані розподіленої файлової системи honeypot, а також автоматизоване реагування на спроби доступу; 3) провести експериментальне дослідження щодо ефективності запропонованої системи.

Виклад основного матеріалу. Розроблений фреймворк призначений для виявлення вторгнень зловмисних програм. Зокрема, підсистема здатна ідентифікувати віруси та трояни, які намагаються отримати доступ до файлів, що містять конфіденційну інформацію. Вірус, який копіює або змінює документи, буде виявлено

за допомогою моніторингу часу зміни файлу. Зловмисне троянське програмне забезпечення, яке сканує систему на наявність критичних файлів, може запустити документ honeypot, що призведе до його ідентифікації. Шпигунські програми, які передають файли на віддалені сервери, можна виявити через повторні спроби отримати доступ до honeypot [9].

Програми-хробаки, які автоматично поширюються мережами, можуть інфікувати файл honeypot, дозволяючи відстежувати їхню діяльність. Часті зміни файлів можуть свідчити про наявність зловмисного коду, що поширюється мережею. Автоматичне блокування інфікованого пристрою через брандмауер Windows може допомогти стримати поширення загрози [10].

Файл honeypot також можна використовувати для виявлення програм-вимагачів (наприклад, WannaCry, Ryuk, LockBit) [11]. Якщо зловмисне програмне забезпечення намагається зашифрувати файл honeypot, система зареєструє зміни в його структурі. Часті спроби модифікації протягом короткого періоду можуть свідчити про атаку програм-вимагачів [12]. Автоматичне блокування підозрілих процесів або мережевої активності може допомогти запобігти подальшому поширенню програм-вимагачів.

Зловмисники, які отримують початковий доступ до системи, часто сканують файлові сервери на наявність цінних даних. Файли Honeypot, розміщені в різних місцях (локальні диски, хмарні служби, спільні папки), можуть допомогти виявити аномальну поведінку користувачів. Якщо невідомий пристрій спробує отримати доступ до файлу, система може повідомити адміністратора та заблокувати IP-адресу. Якщо файл honeypot використовується в корпоративних спільних середовищах (таких як SharePoint або OneDrive), він може допомогти виявити атаки соціальної інженерії, коли зловмисник намагається отримати доступ до внутрішніх документів [13]. Сповіщення про доступ до файлу honeypot з невідомої IP-адреси можуть вказувати на компрометацію облікового запису. Виконання макросів у файлі може виявити зловмисні документи, які намагаються завантажити додаткові зловмисні програми [14].

Особливо складним типом зловмисного програмного забезпечення є метаморфічні віруси. Метаморфічний вірус може спробувати змінити файл honeypot, щоб вставити свій код або активувати зловмисну логіку. Система виявляє такі зміни через тригер модифікації файлу та реєструє вторгнення. Якщо вірус змінює структуру файлу honeypot (наприклад, вводить новий зловмисний код), це буде записано [15]. Якщо метадані файлу (наприклад, час модифікації або права доступу) змінено, система honeypot також виявить це. Метаморфічний вірус може спробувати скопіювати файл honeypot до тимчасових каталогів або змінити його дозволи. У таких випадках активується тригер копіювання файлу або зміни дозволу, що дозволяє виявити незвичну активність у системі. Деякі метаморфічні віруси використовують для поширення локальну або мережеву реплікацію. Якщо файл honeypot розміщено в мережевому середовищі (наприклад, хмарне сховище або сервер), будь-які спроби завантажити або передати його між хостами можуть бути виявлені за допомогою тригера доступу до мережі [16].

Якщо зловмисне програмне забезпечення працює виключно в пам'яті, не змінюючи файли, його буде важко виявити. Крім того, якщо файлову систему обійти, а вірус працює лише через інфіковані процеси, файли honeypot можуть не активуватися. Методи обфускації коду також можуть ускладнити виявлення на основі вмісту файлу.

Стандартний метод створення приманки має певні обмеження, які можуть знизити його ефективність. По-перше, зловмисники можуть ідентифікувати статичні файли honeypot, якщо їм бракує достатньо реалістичних атрибутів, таких як регулярні оновлення вмісту та зміни метаданих [17]. По-друге, традиційні документи honeypot

реагують лише на певні типи доступу і не враховують більш складні атаки, такі як загрози на основі пам'яті або методи обходу файлової системи. Крім того, ці приманки можуть генерувати велику кількість хибних спрацьовувань, особливо коли законні користувачі або автоматизовані процеси випадково взаємодіють з ними. Це може перевантажити системи безпеки та ускладнити аналіз загроз [18].

Таким чином для вдосконалення технології запропоновано наступні дії: 1) динамічні файли honeypot; 2) використання розподіленої файлової системи honeypot; 3) автоматизоване реагування на спроби доступу.

Замість статичних документів слід використовувати динамічні файли, які автоматично змінюють метадані, такі як дата створення, час останнього доступу або дата останньої зміни. Це підвищує довіру до файлу та ускладнює визначення його як приманки. Розміщення файлів honeypot у різних місцях, таких як внутрішні сервери, хмарне сховище та загальнодоступні ресурси, дозволяє відстежувати дії зломисників у різних сегментах мережі. Після виявлення неавторизованого доступу система може автоматично активувати додаткові заходи безпеки, такі як блокування підозрілих IP-адрес, активація розширеного моніторингу або сповіщення аналітиків кібербезпеки для негайного реагування. Підсистема розділена на ключові сегменти, кожен з яких покращує протоколи безпеки, що ускладнює ідентифікацію файлу honeypot серед інших даних, рисунок 1.



Рисунок 1– Підсистема автоматичного реагування на загрози

Джерело: розроблено авторами

Усі ці дії разом допоможуть підвищити надійність системи та покращити захист від несанкціонованого втручання зломисників, рисунок 2.

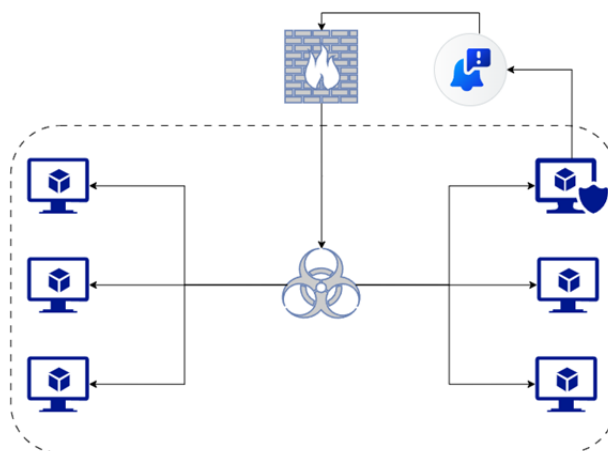


Рисунок 2 – Схема виявлення потенційних загроз за допомогою файлу honeypot

Джерело: розроблено авторами

Динамічні файли honeypot. Динамічні файли-приманки покликані усунути головний недолік традиційних honeypot-документів – їхню статичність. Зловмисники можуть легко виявити такі файли, якщо їхній вміст або мета-дані залишаються незмінними протягом довгого часу. Щоб цього уникнути, необхідно зробити файл таким, що постійно змінюється, не втрачаючи при цьому своєї правдоподібності.

Для реалізації цього підходу можна використовувати Windows із вбудованими інструментами або мову Python. Оптимальним варіантом є створення скрипта, який автоматично оновлюватиме мета-дані файлу, вноситиме незначні зміни у вміст і забезпечуватиме відстеження всіх взаємодій із ним.

Спочатку необхідно підготувати сам honeypot-файл. Його слід зберегти в місці, де до нього можуть отримати доступ потенційні зловмисники, наприклад, у спільній папці або у файловому сховищі організації, рівняння 1. Якщо $E(f)=0$, то файл створюється зі стандартним вмістом S_0 : $f=S_0$, де S_0 = "Confidential Data - Access Restricted".

$$E(f) = \begin{cases} 1, & \text{якщо файл } f \text{ існує} \\ 0, & \text{якщо файл } f \text{ не існує} \end{cases} \quad (1)$$

Після цього потрібно реалізувати механізм періодичної зміни мета-даних файлу. У Python це можна зробити за допомогою модуля `os`, який дозволяє змінювати дату останнього редагування. Наприклад, скрипт може щодня оновлювати атрибут "Last Modified", щоб файл виглядав активним у використанні [19].

Наступним кроком буде внесення випадкових змін у сам вміст файлу. Це можна зробити шляхом додавання невеликих коментарів або змінних фраз у прихованих полях документа. Якщо використовується текстовий файл, можна додати кілька випадкових рядків, які не впливатимуть на загальний вигляд документа, але робитимуть його змінним з точки зору системи. У кінець файлу додається випадковий рядок R , який генерується за формулою 2, де $U(a,b)$ - рівномірний розподіл випадкового числа в інтервалі [1000, 9999].

$$R = \text{"\#LogEntry:"} + U(1000,9999), \quad (2)$$

де $U(a,b)$ - рівномірний розподіл випадкового числа в інтервалі [1000, 9999]. Після цього новий вміст файлу можна записати як рівняння 3, де S_{old} – попередній вміст файлу, а S_{new} – оновлений вміст.

$$S_{new} = S_{old} + R. \quad (3)$$

Після впровадження цих змін слід налаштувати автоматичний запуск скрипта. Це можна представити, як дату останнього редагування файлу $T(f)$ оновлюється до поточного часу T_{now} , рівняння 4, в якому $T_{now} = \text{timestamp}(t)$, а t – поточний момент часу.

$$T(f) = T_{now}. \quad (4)$$

Таким чином, файл-приманка буде постійно оновлюватися, а будь-який доступ до нього залишатиме цифровий слід, що дасть змогу аналізувати активність потенційних зловмисників.

Використання розподіленої файлової системи honeypot. Розподілена система файлів-приманок покликана покращити ефективність honeypot-документів шляхом їх розміщення у різних частинах ІТ-інфраструктури. Якщо файл-приманка знаходиться лише в одному місці, наприклад, на внутрішньому сервері, зловмисник може уникнути взаємодії з ним, і це зменшить його ефективність. Щоб зробити приманку більш привабливою та підвищити ймовірність її використання зловмисниками, потрібно створити копії файлу та поширити їх у різних середовищах, таких як локальні диски, хмарні сховища, внутрішні файлові сервери або корпоративні платформи для обміну документами [20].

Скрипт створює копії файлу-приманки та розміщує їх у кількох місцях у системі. Перед розповсюдженням файл отримує невеликі зміни, щоб уникнути ідентичності всіх копій, що дозволить зробити їх більш правдоподібними. Після цього

він розповсюджується на заздалегідь визначені локації, такі як папки спільного доступу або каталоги, що синхронізуються з хмарними сховищами.

Щоб уникнути зайвого дублювання файлів, скрипт перевіряє, чи файл уже існує в зазначеному місці, і лише потім здійснює його оновлення або перезапис. Під час кожного запуску він змінює мета-дані всіх копій файлу, додаючи новий випадковий рядок у його вміст, відповідно до рівнянь 1-4, після чого автоматично розміщує оновлені версії на заданих шляхах, рівняння 5. Файл-приманка розповсюджується у множину місць $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, де кожен файл f_i у p_i отримує власний унікальний рядок R_i .

$$S(f_i) = S_0 + R_i, \forall i \in [1, n]. \quad (5)$$

Автоматизоване реагування на спроби доступу. Автоматизоване реагування на спроби доступу до файлу-приманки дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози та запобігати подальшій зловмисній діяльності в мережі. Якщо файл honeypot відкривається або копіюється, система повинна негайно зафіксувати цю подію, надіслати відповідне сповіщення адміністраторам безпеки та вжити додаткових заходів, таких як блокування IP-адреси атакуючого або активація розширеного моніторингу активності користувача [21].

Фреймворк працює у фоновому режимі та контролює файл-приманку, відстежуючи його відкриття, зміну або копіювання. Якщо хтось взаємодіє з файлом, програма записує цю подію в журнал безпеки та надсилає сповіщення на вказану електронну адресу або у системний лог. Фреймворк постійно перевіряє час останньої модифікації файлу-приманки f . Час модифікації визначається як $T(f)$, а поточний час - T_{now} рівняння 6.

$$\Delta T = T_{now} - T(f). \quad (6)$$

Якщо різниця ΔT змінюється, це означає, що файл був відкритий або змінений, рівняння 7.

$$\Delta T > 0 \Rightarrow \text{файл змінено}. \quad (7)$$

Якщо виявлено зміну файлу, вона записується у журнал подій L , який містить список часових міток модифікацій $L = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. При кожному новому доступі додається запис $L = L \cup \{T_{now}\}$, де T_{now} - момент останньої зміни файлу.

Крім того, фреймворк може автоматично додати IP-адресу атакуючого до списку заблокованих у брандмауері Windows, що запобігатиме подальшим спробам доступу до мережі [22]. IP-адреса зловмисника визначається через системний журнал. Позначимо її як $IP_{attacker}$. Якщо файл змінено більше ніж N разів за проміжок часу ΔT_{block} , IP-адреса атакуючого додається у список заблокованих адрес B , рівняння 8.

$$\text{Якщо } |L| > N \text{ за } \Delta T_{block}, \text{ то } B = B \cup \{IP_{attacker}\}. \quad (8)$$

Після цього фреймворк додає правило у брандмауер Windows $F_{block}(IP_{attacker}) = 1$, де F_{block} - функція блокування доступу через Windows Firewall.

Об'єднуючи всі вищеописані дії, функцію моніторингу можна представити як рівняння 9.

$$\begin{cases} \text{Якщо } \Delta T > 0, \text{ то } L = L \cup \{T_{now}\} = 1 \\ \text{Якщо } |L| > N \text{ за } \Delta T_{block}, \text{ то } F_{block}\{IP_{attacker}\} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Експериментальне дослідження ефективності. Першим етапом у процесі впровадження honeypot-файлів є створення спеціального файлу, що містить псевдоінформацію, яка може зацікавити зловмисників. Після його створення йому присвоюється атрибут lure, що вказує на його приманкову природу. Однак статичний honeypot-файл може швидко втратити свою ефективність, оскільки зловмисники можуть ідентифікувати його як підробку. Тому для підвищення правдоподібності файлу до нього підключаються спеціальні сценарії, які забезпечують його динамічність та періодичні зміни вмісту. Це робить приманку більш реалістичною та знижує ймовірність її ідентифікації як пастки. У випадку з операційною системою Windows

цей процес можна реалізувати за допомогою планувальника завдань, створивши відповідне завдання, яке періодично виконуватиме певний сценарій, що оновлює honeypot-файл через задані інтервали часу [23].

Наступним важливим кроком є поширення honeypot-файлів у системі. Для того щоб автоматизувати цей процес, було використано мову програмування Python, яка дозволяє гнучко керувати створенням та розповсюдженням таких файлів. З метою запобігання надмірному навантаженню системи, було встановлено обмеження на максимальну кількість honeypot-файлів, що можуть одночасно існувати в системі – їхня кількість не перевищує 50 примірників. Це рішення дозволяє мінімізувати зайве споживання ресурсів та підтримувати ефективність системи. Для забезпечення безперервного оновлення honeypot-файлів у Windows було використано планувальник завдань, який періодично виконує певний сценарій, що автоматично додає або оновлює honeypot-файли в системі. Наприклад, завдання може запускатися кожен годину або щодня, що гарантує їхню постійну ротацію та збільшує ймовірність взаємодії зловмисників із ними [24].

Окрім створення та поширення honeypot-файлів, необхідно впровадити механізм контролю доступу до них. Для цього використовуються політики сповіщень, які можуть бути вбудованими в операційну систему або ж реалізованими через сторонні засоби моніторингу. Такі механізми дозволяють миттєво реагувати на спроби несанкціонованого доступу, а також вести журнал активності для подальшого аналізу загроз.

Останнім етапом налаштування є автоматизація відповіді на виявлені тригери. У разі спрацювання honeypot-файлу активуються відповідні сценарії, які можуть виконувати різні дії – від сповіщення адміністратора до автоматичного збору інформації про зловмисника (рисунк 3). Це дозволяє не лише виявляти спроби злому, а й аналізувати поведінку атакуювальників, що допомагає покращити безпеку системи в майбутньому.

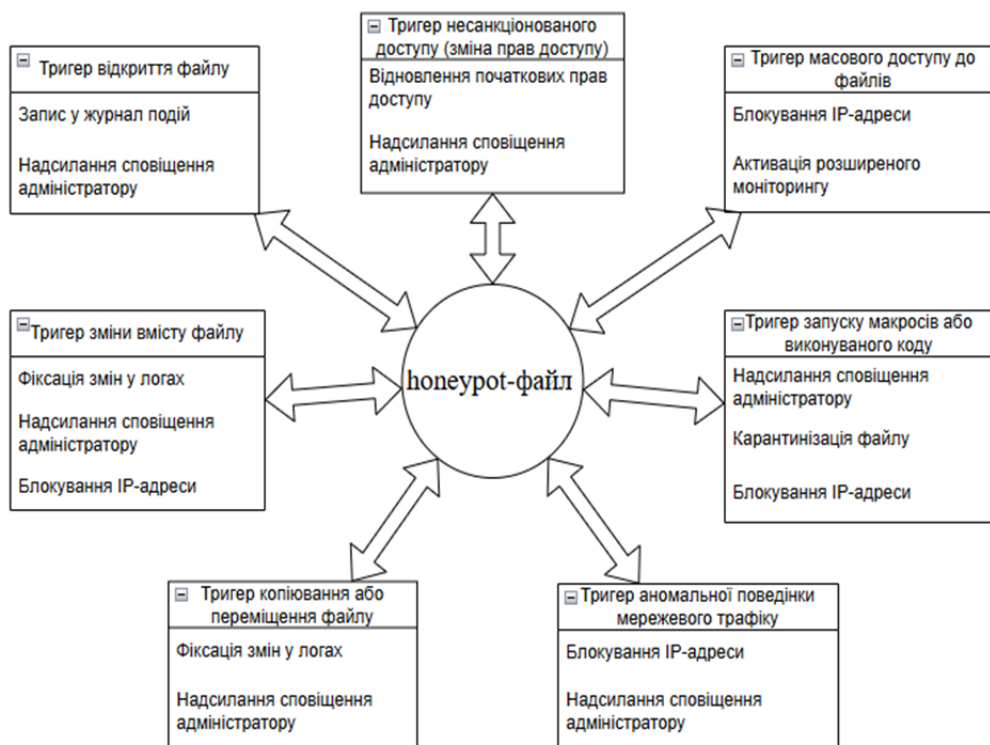


Рисунок 3 – Тригери файлів Honeypot і реакції на них

Джерело: розроблено авторами

Щоб механізм відповіді працював ефективно, необхідно запускати скрипт у фоновому режимі під час запуску операційної системи. Наприклад, це можна зробити за допомогою планувальника завдань Windows, який забезпечить автоматичний запуск програми після перезавантаження комп'ютера. Завдяки такому підходу система зможе миттєво реагувати на підозрілі дії, не вимагаючи постійного втручання адміністратора [25]. Таким чином, якщо хтось спробує завантажити позначений файл, сповіщення буде надіслано на пов'язану електронну адресу, і щоб перевірити систему на вторгнення, буде достатньо переглянути сповіщення, як показано на рис. 4.

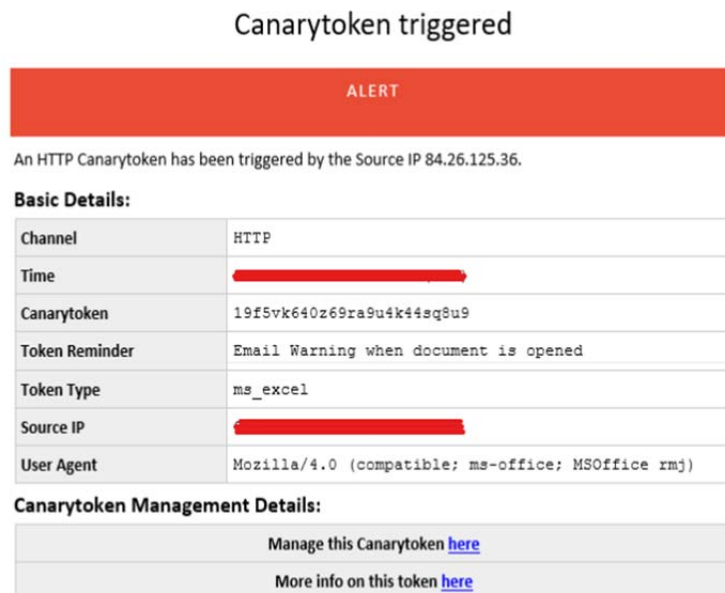


Рисунок 4 – Електронна пошта зі сповіщенням про завантаження файлу
Джерело: розроблено на основі ресурсу Canarytoken

Щоб оцінити ефективність підсистеми, 50 файлів honeypot було розгорнуто в різних середовищах, включаючи локальні сервери, хмарне сховище та мережеві ресурси. За 30 днів було зафіксовано 125 спроб доступу, з яких 80 були визначені як потенційно зловмисні. З таблиці 1 видно, що запропоноване рішення мало хибнопозитивний рівень 10%, тоді як стандартний файл Canarytokens без удосконалень показав у середньому 30%, що свідчить про високий рівень точності виявлення загроз. Система автоматичного блокування IP для зловмисників спрацьовувала в 95% випадків, забезпечуючи оперативне реагування на загрози. Моніторинг активності показав, що середній час реакції системи на спробу доступу до файлу становить 2 секунди, що дозволяє вчасно вжити заходів безпеки. Як видно з таблиці 2, щонайменше чотири з семи тригерів можуть бути активовані для кожного типу загрози, що допомагає зменшити кількість помилкових спрацьовувань і забезпечує відповіді лише на потенційні загрози.

Таблиця 1 – Порівняння методів

Метод	Хибні спрацювання	Ефективність	Час спрацювання	Надійність
Стандартний підхід	30%	60%	1с	70%
Запропонований фреймворк	10%	95%	2с	95%

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, можна відзначити, представлена система забезпечила стабільну роботу без перевантаження ресурсів, а її інтеграція з механізмами кібербезпеки значно знизила ризики компрометації даних.

Таблиця 2 – Відповідність тригерів різним типам загроз

Тригери / Загрози	Віруси	Троянський кінь	Шпигунські програми	Черви	Програми-вимагачі	Метаморфні віруси
Тригер відкриття файлу	Так	Так	Так	Ні	Так	Ні
Тригер зміни вмісту файлу	Так	Так	Ні	Ні	Так	Так
Тригер копіювання або переміщення файлу	Так	Ні	Так	Так	Так	Ні
Тригер несанкціонованого доступу (зміна прав доступу)	Так	Так	Ні	Так	Так	Так
Тригер масового доступу до файлів	Ні	Ні	Так	Так	Так	Так
Тригер ненормальної поведінки мережевого трафіку	Ні	Так	Так	Так	Ні	Так
Тригер для запуску макросів або виконуваного коду	Так	Так	Ні	Ні	Так	Так

Джерело: розроблено авторами

Висновки. У роботі представлено архітектуру розподіленої системи для виявлення кіберзагроз на основі динамічних файлів honeypot, яка поєднує автоматизований моніторинг, розподілене розміщення honeypot-файлів і миттєве реагування на підозрілу активність. Запропонований підхід ефективно ідентифікує широкий спектр загроз, зокрема віруси, трояни, програми-вимагачі та метаморфічні віруси, використовуючи динамічно змінювані файли з реалістичними метаданими.

1. Досліджено класичний підхід до створення файлів-приманок за допомогою Canarytokens. Виявлено, що традиційні методи мають певні обмеження, такі як статичність файлів, обмежена інтеграція з системами захисту та висока ймовірність помилкових спрацьовувань. Це знижує ефективність їх використання у складних кіберзагрозах, особливо при атаках із застосуванням автоматизованих або адаптивних алгоритмів.

2. Запропоновано удосконалену систему захисту, яка базується на динамічних honeypot-файлах та розподіленій файлової системі honeypot. Вона комбінує тригери, такі як зміни вмісту файлу, аномальний мережевий трафік та виконання макросів, що дозволяє значно зменшити кількість помилкових спрацьовувань (до 10% порівняно з традиційними методами – 30%). Також система забезпечує автоматизоване реагування

на спроби доступу, блокуючи 95% зловмисних IP-адрес через інтеграцію з брандмауером Windows із середнім часом відповіді 2 секунди.

3. Проведено експериментальне тестування показало, що розподілене розміщення до 50 honeypot-файлів у різних середовищах (локальні сервери, хмарні сховища, корпоративні платформи) значно підвищує ймовірність виявлення загроз. Водночас система має певні обмеження – вона менш ефективна проти шкідливого програмного забезпечення, що працює виключно в пам'яті або обходить файловою системою, а також потребує вдосконалення алгоритмів аналізу для детектування обфусцованого коду.

Запропоновану систему можна інтегрувати в корпоративні механізми безпеки для покращення захисту від атак соціальної інженерії та автоматизованих кібератак. Майбутні дослідження можуть бути зосереджені на розширенні функціональних можливостей для боротьби зі складнішими загрозами, такими як атаки, керовані штучним інтелектом, а також на оптимізації використання ресурсів під час масштабування системи. Загалом, отримані результати демонструють, що поєднання динамічних технологій honeypot та автоматизації суттєво підвищує рівень кіберзахисту сучасних IT-інфраструктур.

Список літератури

1. Campbell R., Padayachee K., Masombuka T. A survey of honeypot research: Trends and opportunities, *10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, London, UK, 2015, P. 208-212. doi: 10.1109/ICITST.2015.7412090.
2. Fraunholz D., Schotten H. D. An adaptive honeypot configuration, deployment and maintenance strategy. *International Conference on Cyber Situational Awareness, Data Analytics and Assessment (Cyber SA)*, IEEE, 2017. P. 1–8.
3. Pauna A., Patriciu V. V. Enhancing cybersecurity with honeypot systems: A case study. *11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2019. P. 1–6.
4. Rentao Gu., Zeyuan Yang., Yuefeng Ji. Machine learning for intelligent optical networks: A comprehensive survey *Journal of Network and Computer Applications*. 2020.
5. Madison Z. D. Honeyhive – A Network Intrusion Detection System Framework Utilizing Distributed Internet of Things Honeypot Sensors. *Theses and Dissertations*. 2020.
6. Kashtalian A., Lysenko S., Savenko O., Nicheporuk A., Sochor T., Avsiyevych V. Multi-computer malware detection systems with metamorphic functionality. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. Vol. 1. P. 152–175. DOI: 10.32620/reks.2024.1.13.
7. Savenko O., Lysenko S., Nicheporuk A. Metamorphic viruses' detection technique based on the equivalent functional block search. CEUR-WS. 2017. Vol. 1844. P. 555–569.
8. Canarytokens. Canarytokens – Quick, Free, Detection for the Masses. Retrieved from: <https://canarytokens.org/generate>.
9. Fraunholz D., Schotten H. D. An adaptive honeypot configuration, deployment and maintenance strategy. *International Conference on Cyber Situational Awareness, Data Analytics and Assessment (Cyber SA)*, IEEE, 2017. P. 1–8.
10. Peng Z., Xiaoqing G., Surya N., Jianying Z. Modeling social worm propagation for advanced persistent threats. *Computers & Security*. 2021. P. 102321. DOI: 10.1016/j.cose.2021.102321.
11. Kambourakis G., Koliass C. Honeypots for ransomware detection: A case study on WannaCry and LockBit. *Computers & Security*. 2020. Vol. 95. P. 101823.
12. Lysenko S., Atamaniuk O., Bokhonko O., Vorobiyov V. Method for detection of ransomware cyber threats based on honeypot. CEUR-WS. 2023. P. 300–309.
13. Alsaheel A., Nan Y., Yu L. ATLAS: A practical framework for adaptive threat detection in enterprise environments. *IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2021. P. 1–18.
14. Eriksson B., Pellegrino G., Sabelfeld A. Black Widow: Blackbox Data-driven Web Scanning. *Symposium on Security and Privacy (SP)*, San Francisco, CA, USA, 2021, IEEE pp. 1125-1142, doi: 10.1109/SP40001.2021.00022.
15. Savenko O., Lysenko S., Nicheporuk A., Savenko B. Approach for the unknown metamorphic virus detection. *8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, Bucharest, 2017. P. 71–76.

16. Markowsky G., Savenko O., Lysenko S., Nicheporuk A. The technique for metamorphic viruses' detection based on its obfuscation features analysis. *CEUR-WS*. 2018. Vol. 2104. P. 680–687.
17. Kambourakis G., Genç Z. Dynamic honeypot configuration to mitigate static detection in ransomware attacks. *Computers & Security*. 2020. Vol. 96. P. 101923.
18. Beuran R., Inoue T., Tan Y. Realistic Cybersecurity Training via Scenario Progression Management. *European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)*, Stockholm, Sweden, IEEE 2019, P. 67-76. doi: 10.1109/EuroSPW.2019.00014.
19. Sethuraman S., Jadapalli T., Sudhakaran D. Flow based containerized honeypot approach for network traffic analysis: An empirical study. *Computer Science Review*. 2023. P. 5–10. doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100600.
20. Baykara M., Das R. A novel honeypot based security approach for real-time intrusion detection and prevention systems. *Journal of Information Security and Applications*. 2018. P. 103-116. doi: 10.1016/j.jisa.2018.06.004.
21. Fraunholz D., Zimmermann M., Schotten H. D. SOAR-integrated honeypots for automated threat response. *17th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES)*, ACM, 2022. P. 1–10.
22. Nguyen T., Jones M. Automated threat response in honeypot-enabled networks using dynamic firewall rules. *IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*, IEEE, 2021. P. 1–9.
23. Gupta R., Patel A. Automating security maintenance in Windows environments: A task scheduler approach. *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, IEEE, 2020. P. 1–6.
24. Alotaibi B., Elleithy K. Scalable honeypot deployment using Python scripting for enterprise networks. *Journal of Cybersecurity and Privacy*. 2021. Vol. 1, no. 2. P. 234–250.
25. Johnson L., Martinez C. Persistent security automation in Windows: Leveraging task scheduler for background threat response. *IEEE Symposium on Cybersecurity Applications and Technologies (SCAT)*, IEEE, 2022. P. 1–7.

References

1. Campbell, R., Padayachee, K., & Masombuka, T. (2015). A survey of honeypot research: Trends and opportunities. *10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, 208–212. <https://doi.org/10.1109/ICITST.2015.7412090>
2. Fraunholz, D., & Schotten, H. D. (2017). An adaptive honeypot configuration, deployment and maintenance strategy. *International Conference on Cyber Situational Awareness, Data Analytics and Assessment (Cyber SA)*, 1–8.
3. Pauna, A., & Patriciu, V. V. (2019). Enhancing cybersecurity with honeypot systems: A case study. *11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 1–6.
4. Gu, R., Yang, Z., & Ji, Y. (2020). Machine learning for intelligent optical networks: A comprehensive survey. *Journal of Network and Computer Applications*, arXiv:2003.05290
5. Madison, Z. D. (2022). Honeyhive – A network intrusion detection system framework utilizing distributed Internet of Things honeypot sensors, Thesis, AD1102962.
6. Kashtalian, A., Lysenko, S., Savenko, O., Nicheporuk, A., Sochor, T., & Avsiyevych, V. (2024). Multi-computer malware detection systems with metamorphic functionality. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024(1), 152–175. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.13>
7. Savenko, O., Lysenko, S., & Nicheporuk, A. (2017). Metamorphic viruses' detection technique based on the equivalent functional block search. *CEUR-WS*, 1844, 555–569.
8. Canarytokens. (n.d.). Canarytokens – Quick, free, detection for the masses. Retrieved from <https://canarytokens.org/generate>
9. Peng, Z., Xiaojing, G., Surya, N., & Jianying, Z. (2021). Modeling social worm propagation for advanced persistent threats. *Computers & Security*, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102321>
10. Kambourakis, G., & Kolias, C. (2020). Honeypots for ransomware detection: A case study on WannaCry and LockBit. *Computers & Security*, 95, 101823.
11. Lysenko, S., Atamaniuk, O., Bokhonko, O., & Vorobiyov, V. (2023). Method for detection of ransomware cyber threats based on honeypot. *CEUR-WS*, 300–309.
12. Alsaheel, A., Nan, Y., & Yu, L. (2021). ATLAS: A practical framework for adaptive threat detection in enterprise environments. *IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 1–18.
13. Eriksson, B., Pellegrino, G., & Sabelfeld, A. (2021). Black Widow: Blackbox data-driven web scanning. *Symposium on Security and Privacy (SP)*, 1125–1142. <https://doi.org/10.1109/SP40001.2021.00022>
14. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., & Savenko, B. (2017). Approach for the unknown metamorphic

- virus detection. *8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, 71–76.
15. Markowsky, G., Savenko, O., Lysenko, S., & Nicheporuk, A. (2018). The technique for metamorphic viruses' detection based on its obfuscation features analysis. *CEUR-WS*, 2104, 680–687.
 16. Kambourakis, G., & Genç, Z. (2020). Dynamic honeypot configuration to mitigate static detection in ransomware attacks. *Computers & Security*, 96, 101923.
 17. Beuran, R., Inoue, T., & Tan, Y. (2019). Realistic cybersecurity training via scenario progression management. *European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)*, 67–76. <https://doi.org/10.1109/EuroSPW.2019.00014>
 18. Sethuraman, S., Jadapalli, T., & Sudhakaran, D. (2023). Flow-based containerized honeypot approach for network traffic analysis: An empirical study. *Computer Science Review*, 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100600>
 19. Baykara, M., & Das, R. (2018). A novel honeypot-based security approach for real-time intrusion detection and prevention systems. *Journal of Information Security and Applications*, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2018.06.004>
 20. Fraunholz, D., Zimmermann, M., & Schotten, H. D. (2022). SOAR-integrated honeypots for automated threat response. *17th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES)*, ACM, 1–10.
 21. Nguyen, T., & Jones, M. (2021). Automated threat response in honeypot-enabled networks using dynamic firewall rules. *IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*, 1–9.
 22. Gupta, R., & Patel, A. (2020). Automating security maintenance in Windows environments: A task scheduler approach. *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* 1–6.
 23. Alotaibi, B., & Elleithy, K. (2021). Scalable honeypot deployment using Python scripting for enterprise networks. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 1(2), 234–250.
 24. Johnson, L., & Martinez, C. (2022). Persistent security automation in Windows: Leveraging task scheduler for background threat response. *IEEE Symposium on Cybersecurity Applications and Technologies (SCAT)*, 1–7.

Maksym Prodeus, **Andrii Nicheporuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Antonina Kashtalian**, Assoc. Prof., PhD tech. sci. *Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine*

Honeypot-Based Information Monitoring, Detection, Response and Protection System

The increasing complexity of cyber threats poses significant challenges to existing security measures, which often fail to provide sufficient protection. This paper presents an approach to improving cybersecurity through honeypot-based techniques. The study focuses on the development and deployment of decoy files designed to detect unauthorized access attempts and monitor malicious activities. Honeypots play a crucial role in identifying various attack types, including insider threats and masquerade attacks, which traditional security systems often overlook. The paper also discusses the integration of honeypots into comprehensive security frameworks, examining their optimal use cases and effectiveness in real-world applications.

The research explores the design and implementation of an advanced honeypot framework that enhances threat detection and response. The proposed system utilizes dynamic decoy files, which change metadata and content to maintain authenticity and attract malicious actors. Various triggers, such as file access, modification, and unauthorized copying, are employed to detect suspicious behavior. The study also evaluates the effectiveness of automated response mechanisms, including IP blocking and real-time monitoring. The framework's performance is analyzed through experimental deployment across different IT environments, highlighting its advantages over traditional static honeypots. Key performance indicators, including detection accuracy, response time, and false positive rates, are assessed to validate the system's reliability.

The results demonstrate that the proposed honeypot-based system significantly improves threat detection and response capabilities while minimizing false alarms. The integration of dynamic honeypots into corporate cybersecurity infrastructures enhances resilience against cyberattacks, including ransomware and advanced persistent threats. However, certain limitations, such as the inability to detect memory-only malware and highly obfuscated threats, remain challenges for future research. The study concludes that adaptive honeypot strategies, combined with automated threat intelligence, can substantially enhance modern cybersecurity defense mechanisms.

decoy files, honeypot, network security, threat detection, cyber defense, corporate networks

Одержано (Received) 06.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.06

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.68-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.68-74)

Д. В. Вахніченко, канд. техн. наук, М. О. Годунко, доц., канд. техн. наук, С. В. Писанка
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vakhnichenkod@gmail.com, maksimgodunko83@gmail.com, sergii.pysanka@gmail.com

Дослідження рухових можливостей кінематичних ланок МПС при формоутворюючих рухах осьовим інструментом

В статті виконано кінематичний аналіз формоутворюючих рухів верстату з механізмом паралельної структури (МПС) при виконанні типових технологічних операцій. Розглянуто математичну модель верстату типу «гексапод» при виконанні даних операцій, таких як свердління та фрезерування. Досліджено рухові можливостей кінематичних ланок МПС при лінійних, площинних та просторових формоутворюючих рухах. Визначено залежності між координатними рухами інструменту в процесі обробки та зміною довжини кінематичних ланок МПС.

механізм паралельної структури, верстат з паралельною кінематикою, гексапод

Постановка проблеми. Сучасне верстатобудування ставить перед собою ряд завдань щодо розвитку, вдосконалення існуючого обладнання та пошуку нових інноваційних рішень, які призводять до створення нового обладнання. Не оминуло це і верстати з механізмами паралельної структури (МПС), які після етапу впровадження у верстатобудування перейшли до етапу вдосконалення їх функціональних та технологічних можливостей. Будь-яка запропонована конструкція верстату з МПС потребує обґрунтування вибору конструктивних параметрів та технічних характеристик для можливості подальшого впровадження даного обладнання у виробництво.

Функціональні можливості верстату з МПС пов'язані насамперед з компоновкою і конструктивним виконанням основних елементів МПС та верстатної системи в цілому. Технологічні можливості верстату залежать від конструкторсько-геометричних параметрів оброблюваних деталей, методу обробки, схем формоутворюючих поверхонь та реалізації координатних рухів пов'язаних з процесом обробки.

Компоновка верстату з МПС зазвичай має модульне виконання, до основних модулів якої можна віднести: несучу систему (каркас), виконавчий орган з приводом головного руху та інструментом, кінематичні ланки з індивідуальним приводом та опорними вузлами. Також присутні функціональні сервісні систем, до яких належать системи числового програмного управління (ЧПУ), контролю та діагностики, зміни інструменту, змащення та інші.

На обґрунтування вибору параметрів верстату впливає відповідність між технічними характеристиками МПС та величиною необхідних координатних рухів, узгодженість технічних характеристик верстата з вимогами до виконання технологічної операції та конструкторсько-геометричні параметрами оброблюваної деталі.

Так як координатні переміщення виконавчого органу для реалізації технологічної операції пов'язаною з обробкою деталей виконуються кінематичними ланками, то пропонується дослідити показник рухових можливостей кінематичних ланок МПС при виконанні процесу формоутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні проведено багато різних

досліджень самих механізмами паралельної структури та верстатів побудованих на їх основі. Визначено, що для доцільного вибору верстату на основі механізму паралельної структури необхідно визначити робочий простір самого МПС та простір в якому виконується безпосередньо сама обробка [2, 3, 8, 9].

Після визначення робочого простору МПС, визначаються необхідні координатні переміщення інструменту в межах робочого простору, що характеризуються, як рухові можливості верстату [1, 5] для забезпечення виконання технологічної операції обробки

Технологічні операції пов'язані з процесом обробки можуть характеризуватися простими рухами, наприклад виконання операції свердління [2, 4] так і складними просторовими рухами, наприклад виконання формоутворюючих рухів на багатоцільовому токарному верстаті з МПС [7].

Постановка завдання. Переважним напрямком використання верстатів з МПС є виконання обробки деталей складної форми за рахунок високої рухомості виконавчого органу. Найбільше розповсюдження отримав верстат з МПС типу «гексапод», оскільки має 6 кінематичних ланок, що забезпечує достатню жорсткість та рухливість.

Для більш якісного проектування даного обладнання необхідний обґрунтований вибір його конструктивних параметрів від яких залежать його рухові можливості по лінії, в площині та просторі.

Так, з попередніх досліджень конструктивних параметрів при виконанні свердлильних операцій визначено, що найбільший вплив на показник рухових можливостей має довжина кінематичних ланок, так як вона забезпечує координатні переміщення інструменту в процесі обробки [4].

Пропонується дослідити показник рухових можливостей кінематичної ланок верстату з МПС при більш складних формоутворюючих рухах інструменту при виконанні технологічної операції механічної обробки, наприклад фрезерування.

Викладення основного матеріалу. Функціональні можливості верстата з МПС насамперед залежать від геометричного простору в якому відбувається функціонування.

В даних дослідженнях розглядається технологічна частина робочого простору верстату з МПС, яка формується вершиною ріжучого інструменту і включає в себе зону установчих рухів, технологічну зону (зона обробки) і резервну технологічну зону (рис.1).

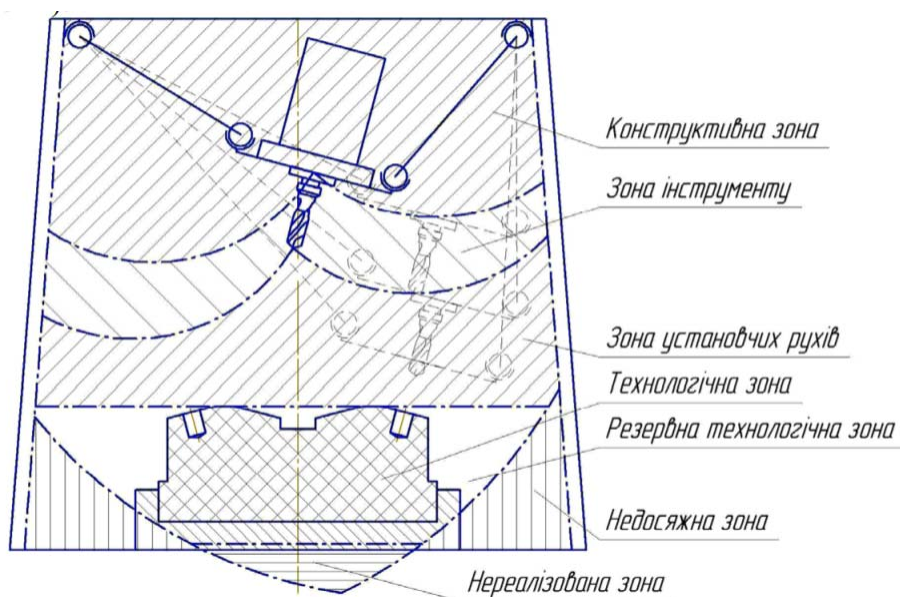


Рисунок 1 – Поділ робочого простору верстату з МПС на зони

Джерело: розроблено на основі [2]

Обґрунтування величини робочого простору в залежності від виконуваної технологічної операції дозволяє встановити габаритні і конструкторсько-технологічні розміри верстату з механізмом паралельної структури та його основних модулів. В залежності від виду технологічної операції оцінка робочого простору може оцінюватись різними показниками, так для виконання лінійних переміщень достатньо оцінки по лінії та в площині (свердління, розточування), для операцій фрезерування треба виконувати оцінку робочого простору слід виконувати в площині та об'ємному просторі.

Після визначення робочого простору для виконання технологічної операції механічної обробки необхідно врахувати координатні рухи кінематичних ланок МПС, що забезпечують просторову орієнтацію виконавчого органу та забезпечують його лінійні та обертові формоутворюючі рухи.

Важливо, при проектуванні верстатів з МПС необхідно забезпечити його подальше ефективне функціонування, що має вплив на формоутворення та обробку деталі в цілому.

До типових технологічних рухів верстату з МПС можна віднести переміщення виконавчого органу з інструментом при розточуванні, свердлінні, фрезеруванні в яких виконавчий орган з інструментом здійснює рух подачі, а також допоміжні рухи – переміщення, підведення і відведення інструмента.

Пріоритетними схемами обробки осьовим інструментом для даного обладнання є виконання свердлильних і фрезерних операцій. Тому було розглянуто свердління під кутом в просторі (переміщення інструменту із зміною кількох координат одночасно) та фрезерування у площині та просторі за різними технологічними схемами.

При обґрунтуванні конструктивних параметрів МПС, із попередніх досліджень, було запропоновано ряд співвідношень між конструктивними параметрами верстату з МПС. Оскільки найбільший вплив на рухові можливості версту з МПС має зміна довжини кінематичної ланки, в даних дослідженнях її оцінку виконаємо відповідним показником, який являє собою відношення поточної довжини кінематичної ланки (l_{nom}) до максимально можливої (L_{max}) [4,5]:

$$i = \frac{l_{nom}}{L_{max}} \quad (1)$$

Для виконання досліджень в програмному середовищі MathCad було використано загальну математичну модель конструкції верстату з МПС враховуючі розташування його опорних вузлів у вигляді матриці [6] та відповідно створено математичну модель кожної кінематичної ланки (рис.2) з урахуванням координатних переміщень у просторі.

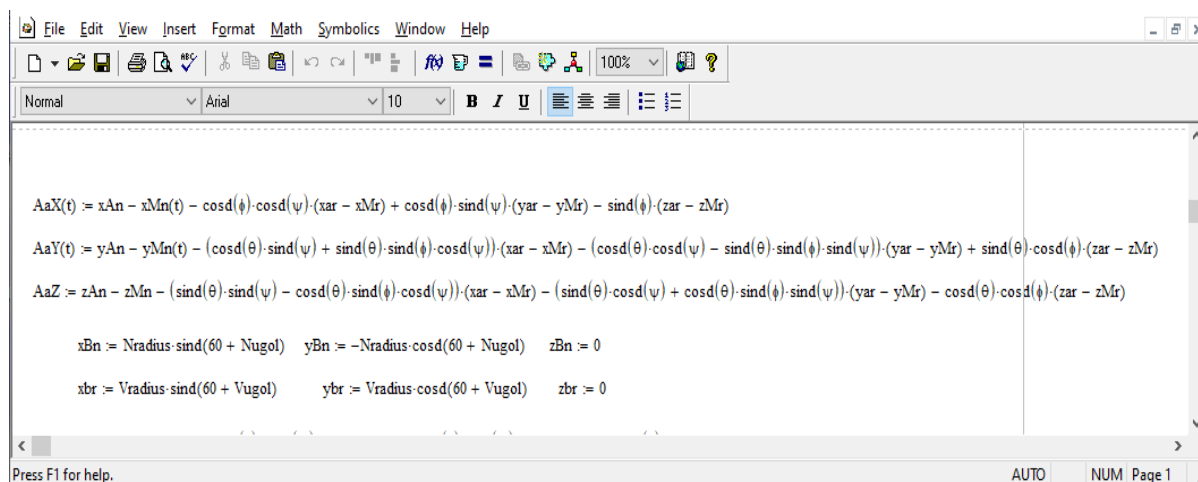


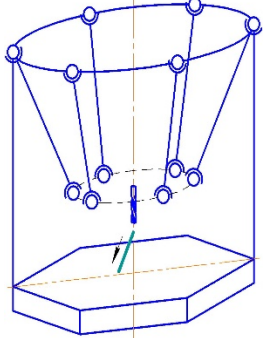
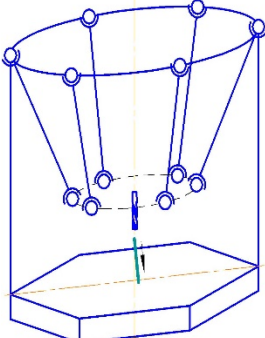
Рисунок 2 – Математична модель кінематичної ланки змінної довжини верстату типу «гексапод»
Джерело: розроблено на основі [2,6]

Для виконання технологічної операції було створено математичні моделі траєкторій формуючого руху вершини інструменту, який встановлено на виконавчому органі верстату. Виконавчий орган орієнтується в просторі кінематичними ланками змінної довжини, рухові можливості яких і досліджуються в даній роботі. При цьому в дослідженнях не було враховано обмеження, що можуть бути накладені системою опорних шарнірів за рахунок максимальних кутів обертання відносно їх вісі.

Схеми типових формуючих рухів та аналіз рухових можливостей кінематичних ланок (які позначено А,В,С,Д,Е,Ф) наведено нижче (табл.1-табл.3).

Першими розглянуто схеми за якими виконуються операції розточування, свердління чи підвід інструменту, при якому переміщення інструменту відбувається вздовж однієї з координат або кількох одночасно. Зміни довжини кінематичних ланок при переміщенні по кількох координатах одночасно представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Формуючі рухи верстатом типу «гексапод» при переміщенні вздовж кількох координат

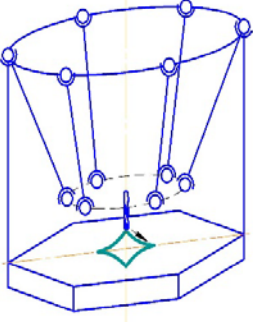
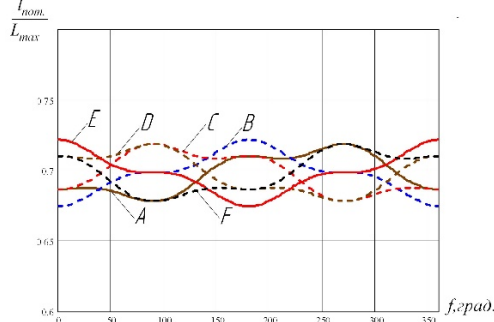
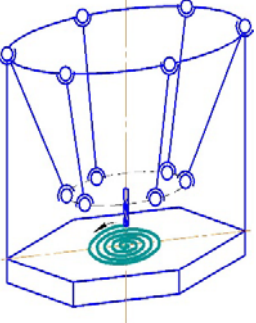
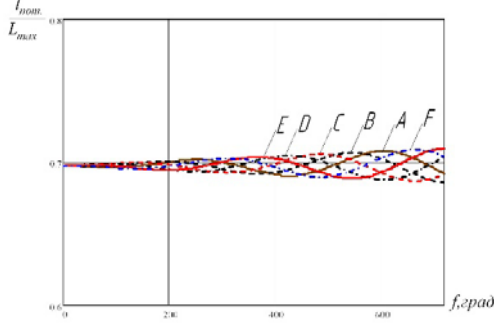
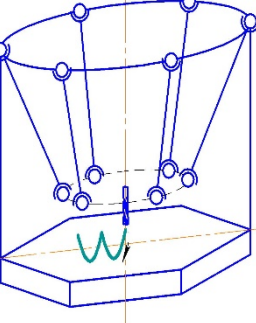
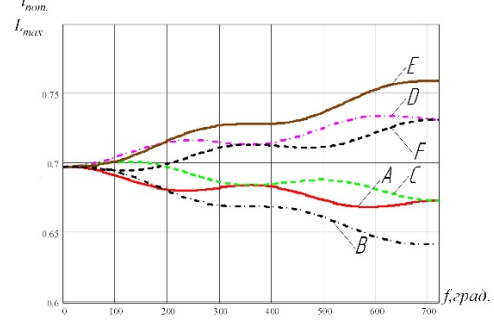
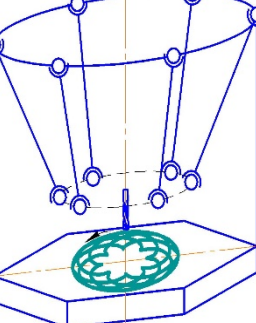
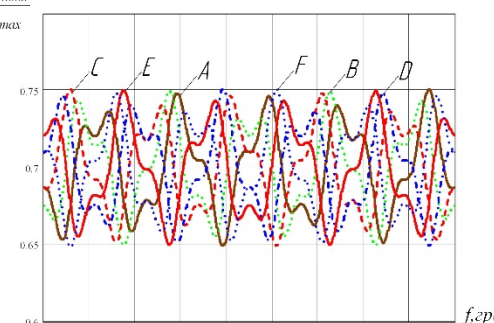
Формуючий рух та його типова схема	Показник рухових можливостей кожної кінематичної ланки при формуюванні
<p>Рух інструменту по XZ</p> 	
<p>Рух інструменту по YZ</p> 	

Джерело: розроблено авторами

Однією з переваг верстатів з МПС є обробка складних фасонних поверхонь та обробка за технологічними схемами із складними траєкторіями руху інструменту. Розглянемо процес фрезерування за деякими типовими технологічними схемами. Зміну показника довжини кінематичних ланок при фрезеруванні в площині за технологічними схемами: «по астроїда», «по архімедовій спіралі», «по подовженій циклоїді» та «по епіциклоїді» представлено в таблиці 2.

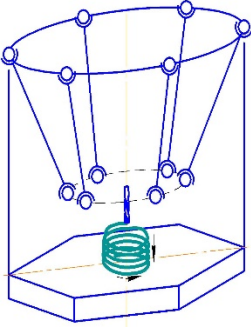
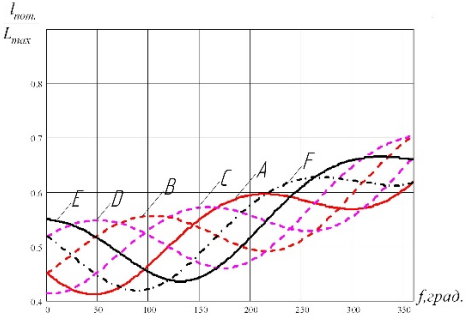
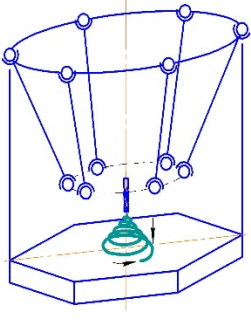
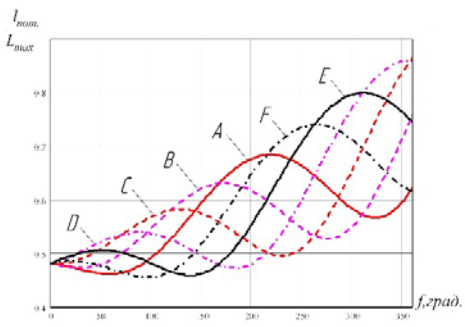
Зміна довжини кінематичних ланок при типових технологічних рухах в просторі розглянуто за схемами обробки по циліндричній і конічній гвинтовій лінії та відображено в таблиці 3.

Таблиця 2 – Формоутворюючі рухи верстатом типу «гексапод» в площині

Формоутворюючий рух та його типова схема		Показник рухових можливостей кожної кінематичної ланки при формоутворенні
<p>Рух інструменту «по астроді»</p>		
<p>Рух інструменту «по архімедовій спіралі»</p>		
<p>Рух інструменту «по циклоїді»</p>		
<p>Рух інструменту «по епіциклоїді»</p>		

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Формоутворюючі рухи верстатом типу «гексапод» в просторі

Формоутворюючий рух та його типова схема		Показник рухових можливостей кожної кінематичної ланки при формоутворенні
Рух інструменту по циліндричній гвинтовій лінії		
Рух інструменту по конічній гвинтовій лінії		

Джерело: розроблено авторами

Висновки. При лінійному переміщенні інструменту в площинах XZ та YZ (табл.1) кожна кінематична ланка змінює довжину за відповідним законом: для схеми переміщення XZ довжина кінематичних ланок A, B, C зменшується, а D, E, F збільшується; для схеми YZ довжина кінематичних ланок C, D збільшується, B, E зменшується менш інтенсивно, а довжина кінематичних ланок A, F зменшується більш інтенсивно.

Зміна довжини кінематичних ланок при русі інструменту «по астріїді» та «по епіциклоїді» (табл.2) відбувається за відповідним законом при цьому збільшуючись і зменшуючись в невеликих межах. При русі «по архімедовій спіралі» довжина кінематичних ланок змінюється по синусоїді, при цьому довжина їх зростає по мірі віддалення від центру симетрії МПС. Рух «по подовженій циклоїді» змінює довжину кінематичних ланок за відповідним законом, довжина кінематичних ланок B, D, E збільшується, а A, C, F зменшується в залежності від того, в якому напрямку рухається інструмент від вісі симетрії МПС.

Розглянувши показник рухових можливостей кінематичної ланки при формоутворюючих рухах верстату з МПС в просторі (табл.3) бачимо, що для кожної із схем довжина кінематичних ланок змінюється по синусоїді та при цьому довжина їх збільшується по мірі переміщення інструменту по вісі Z. Відмінним є те, що для схеми «по циліндричній гвинтовій лінії» амплітуда коливання синусоїди зменшується, а для схеми «по конічній гвинтовій лінії» має протилежний характер.

Список літератури

1. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. Кіровоград: КНТУ, 2007, 420 с.
2. Павленко І.І., Вахніченко Д.В. Дослідження робочого простору верстата з паралельною структурою. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Машинобудування*. 2014. Вип.71. С. 66-70.
3. Струтинський В.Б., Кириченко А.М. Геометрична побудова робочого простору обладнання з механізмами паралельної структури. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного*

- технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2011. Вип. 24. С. 216-222.
4. Павленко І.І., Вахніченко Д.В., Годунко М.О. Аналіз впливу конструктивних параметрів МПК на рух платформи під кутом. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24., Ч. 1. С. 279–283.
 5. Павленко І.І., Валявський І.А. Рухові характеристики верстатів з паралельною кінематикою. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2008. Вип. 21. С. 304-3010.
 6. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Математичне моделювання положення вихідного органу І-координатного механізму. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2003. Вип. 12. С. 223–229.
 7. Кузнецов Ю. М. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури у верстатах нових компоновок. *Вісник Тернопільського державного технічного університету: машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки*. 2008. Вип. 13. С. 61–70.
 8. Angeles J. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms*. Springer, 2002, 520 p.
 9. Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.

References

1. Pavlenko, I.I. (2007). *Industrial robots: basics of calculation and design*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
2. Pavlenko I.I., Vahnichenko D.V. (2014) *Research of zones of working space of the machine with parallel structure mechanism*. Kyiv: NTUU “KPI” [in Ukrainian].
3. Strutinskij V.B., Kirichenko A.M. (2011) *Geometric construction of the working space of parallel structure mechanisms*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
4. Pavlenko, I.I., Vakhnichenko, D.V., Hodunko, M.O. (2011). *Research of influence of design data on geometric parameters of the parallel structure mechanism*. [in Ukrainian].
5. Pavlenko, I.I. & Valiavs'kyj, I.A. (2008). *Motor characteristics of machines with parallel kinematics*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
6. Valyavskij I.A., Krizhanivskij V.A. (2003) *Mathematical modeling of the position of the moving platform of the parallel structure mechanism*. Kirovohrad: KDTU [in Ukrainian].
7. Kuznyecov Yu. M. (2008) *Visualization of form-forming movements by parallel structure mechanisms*. Ternopil: TDTU [in Ukrainian].
8. Bi Angeles J. (2002) *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms*. Springer.
9. Merlet J.-P. (2000) *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers.

Dmytro Vakhnichenko, PhD tech. sci., **Maksym Hodunko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergii Pysanka**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Research on the Motor Capabilities of the Kinematic Links of the Machine with PKM During Shaping Movements with an Axial Tool

Any proposed design of a machine with parallel kinematics machine (PKM) requires justification of the choice of design parameters and technical characteristics for the further implementation of this equipment in production. Since the coordinate movements of the executive body for the implementation of the technological operation associated with the processing of parts are performed by kinematic links, the indicator of the motor capabilities of the kinematic links of the PKM during the shaping process was investigated.

To carry out research in the MathCad, a general mathematical model of the design of a machine with PKM. First of all, boring and drilling schemes are considered, in which the tool moves along one or more coordinates simultaneously. Then, processing according to technological schemes with complex tool motion trajectories is considered, milling in a plane according to the technological schemes: along an astroid, along an Archimedean spiral, along an elongated cycloid and along an epicycloid. The change in the length of kinematic links during typical technological movements in space is considered according to the processing schemes along a cylindrical and conical helical line.

During linear movement of the tool in the XZ and YZ planes, the length of some kinematic links increases, while others decrease. The change in the length of kinematic links during movement of the tool “along an astroid” and “along an epicycloid” increases and decreases within small limits. During movement “along an Archimedean spiral”, the length of the kinematic links changes according to a sinusoid. Movement “along an elongated cycloid” changes the length of the kinematic links according to the corresponding law. The change in the length of kinematic links during machining “along a helical line” occurs according to a sinusoid, and their length increases when the tool moves along the Z axis. For the machining scheme “along a conical helical line”, it has the opposite character.

parallel structure mechanism, machine tool with parallel kinematics, hexapod

Одержано (Received) 12.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

І. Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **А. Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук,
Т. С. Дубиняк, доц., канд. техн. наук, **О. Ю. Стібайло**, **А. Б. Гупка**, доц., канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: gevkoiivan1@ukr.net

Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків

Представлено технологічний процес виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків з виконанням основних операцій. До них відносяться початкове калібрування навитої щільним пакетом на ребро спіралі шнека; проточування зовнішньої крайки спіралі шнека; заточування зовнішньої крайки спіралі шнека; розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека на певну глибину з відповідним кроком з метою отримання заготовок під ножі-подрібнювачі; загинання ножів-подрібнювачів на спіралі шнека на певний кут; кінцеве калібрування спіралі шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами на встановлений крок. Для реалізації даного технологічного процесу розроблено схеми проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі, їх загинання, а також калібрування спіралі шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами на потрібний крок. Визначено основні конструктивно-технологічні параметри операцій проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, а також виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралі шнека.

ножі-подрібнювачі, спіраль шнека, гвинтовий робочий орган, спосіб, технологія, технологічний процес

Постановка проблеми. Гвинтові робочі органи оснащені ножами-подрібнювачами та подібними лопатевими елементами використовують в різних галузях економіки, таких, як будівельна, харчова і переробна, гірничо-видобувна, при будівництві шляхів тощо. При їх використанні часто забезпечується поєднання різних технологічних операцій, пов'язаних із перетворенням сільськогосподарських та інших продуктів, зокрема подрібнення, змішування і переміщення [1-4]. Проте найширше використання вони знайшли у засобах для виробництва матеріалів, комбикормів та інших кормів сільськогосподарського призначення для годівлі великої рогатої худоби, свиней, інших тварин та птиці [1-4]. Враховуючи значні витрати на приготування кормів з коренеплодів в тваринництві [1], що включають їх подрібнення, проблема виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків є досить важливою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробленню та вивченню особливостей технологічних процесів отримання спіралей шнеків різними методами присвячені праці багатьох дослідників [5-20]. Їхні зусилля були сконцентровані на проектуванні та дослідженні технологічних процесів отримання стандартних і спеціальних спіралей шнеків, зокрема гофрованих, стрічкових, лопатевих, Г- і П-подібних, оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами різних конфігурацій і типів, з пружними та еластичними елементами тощо [5-14]. Також важливим аспектом розроблення технологічних процесів отримання спіралей шнеків є залучення в них різного типу обладнання та оснащення, а відтак процесам їх проектування і розрахунку також надавалась суттєва увага [5, 6, 8-12, 16-20].

Метою роботи є технологічне проектування процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків.

Виклад основного матеріалу. Виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків є досить складним процесом, який передбачає виконання певного набору

технологічних операцій. На сьогодні опрацьовано окремі технології виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків, які викладено в [6, 8, 9]. Вони передбачають виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків з використанням ручного інструменту [6, 8] та механізовані способи з попереднім розрізанням на певну глибину зовнішньої крайки навитої щільним пакетом на ребро спіралі шнека з подальшим загинанням на ній ножів-подрібнювачів за використанням оправки та ролика, оснащених спеціальними формувальними втулками [9]. Однак, розроблені процеси є досить складними і потребують вдосконалення. З метою зниження енергоємності і трудомісткості процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків нами запропоновано новий технологічний процес, суть якого викладено нижче.

Запропонований технологічний процес виготовлення ножів-подрібнювачів на навитих щільним пакетом на ребро спіралях шнеків включає виконання таких технологічних операцій:

- калібрування навитої щільним пакетом на ребро спіралі шнека на певний крок;
- проточування зовнішньої крайки спіралі шнека;
- заточування зовнішньої крайки спіралі шнека;
- розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека на певну глибину з відповідним кроком з метою отримання заготовок під ножі-подрібнювачі;
- загинання ножів-подрібнювачів на спіралі шнека на певний кут;
- калібрування спіралі шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами на встановлений крок.

Розглянемо згаданий технологічний процес детальніше.

Перша операція - калібрування навитої щільним пакетом на ребро спіралі шнека на певний крок, є широковідомою [5] і не потребує детального обґрунтування, здійснюється відомими методами шляхом або закріплення спіралі шнека в двох опорах (як правило, в оправці, яка кріпиться у шпинделі токарного верстата і в затискному механізмі різцетримача) з подальшим розтягуванням на відповідний крок, або в одній опорі (як правило в оправці, яка кріпиться у шпинделі токарного верстата і містить вал, по якому проходить розтягнення спіралі під час калібрування, що іншим кінцем може кріпитися в центрі задньої бабки токарного верстата) і калібрувального пристосування (як правило клина), яке, здійснюючи повздовжній рух вздовж оправки, забезпечує калібрування спіралі шнека на визначений крок [5].

Особливістю даної операції є встановлення поздовжньої подачі супорта використовуюваного токарного верстата, що дорівнює кроку калібрування спіралі шнека. Виходячи із потреби виготовлення ножів-подрібнювачів висотою 5...40 мм на спіралях шнеків діаметром 50...250 мм, поздовжня подача супорта використовуюваного токарного верстата повинна бути мінімум на кілька міліметрів більшою від заданої висоти ножів-подрібнювачів. Це зумовлено тим, що при подальшому загинанні ножів-подрібнювачів їхня зовнішня кромка не повинна дотикатися до лінії загину ножів-подрібнювачів, які виконані на наступних витках. Необхідність забезпечення потрібної висоти ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків зумовлює підбір відповідного обладнання (токарного верстата), що застосовується у подальших операціях.

Друга операція - проточування зовнішньої крайки спіралі шнека. Вона здійснюється з використанням оригінального оснащення та інструменту, які представлені на рис. 1.

Оправка під відкалібровану на певний крок спіраль шнека складається із внутрішньої труби 1, яка одним кінцем затиснута в патроні 7 токарного верстата, а іншим встановлена в центрі 8 задньої бабки токарного верстата. Зі сторони центра 8 задньої бабки токарного верстата на зовнішній боковій поверхні внутрішньої труби 1

виконано різь, на яку нагвинчуються гайки 4. На внутрішній трубі 1 встановлена зовнішня труба 2, на якій виконано гвинтову наскрізну канавку, що за напрямком і кроком відповідає відкаліброваній на першій операції спіралі шнека. Зовнішня труба 2 закріплена на внутрішній трубі 1 гвинтами 6 зі сторони патрона 4 токарного верстата з можливістю стиску-розтягу гвинтової канавки. З правого боку вздовж усієї довжини гвинтової канавки на зовнішній трубі 2 закріплено гвинтами 5 опорний шнек 3 (як правило, квадратної чи прямокутної форми). Після загвинчування спіралі шнека у гвинтову канавку зовнішньої труби 2 здійснюють її затиск в оправці шляхом затиснення спіралі шнека у гвинтовій канавці загвинчуванням гайок 4.

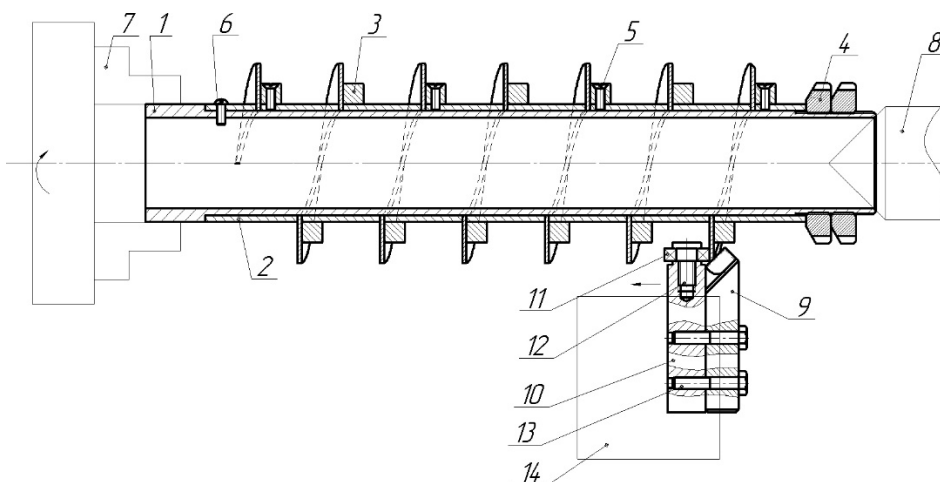


Рисунок 1 - Схема проточування зовнішньої крайки спіралі шнека

Джерело: розроблено авторами

Специфіка інструменту для проточування зовнішньої крайки спіралі шнека полягає в тому, що часто існують значні нерівності зовнішньої крайки спіралі шнека, утворені в процесі навивання, калібрування і її базування та затиску в оправці. Тому інструмент для проточування зовнішньої крайки спіралі шнека включає державку 10, до якої болтами 13 кріпиться різець 9. На торцевій поверхні державки 10, поряд з ріжучим лезом різця 9, в опорі 12 з можливістю колового обертання закріплено підтримуючий ролик 11. Державку 10 закріплено в різцетримачі 14 супорта токарного верстату.

Процес проточування зовнішньої крайки спіралі шнека проходить таким чином. Інструмент для проточування зовнішньої крайки спіралі шнека підводять до оправки таким чином, щоб зовнішня крайка спіралі шнека з торцевої правої сторони була підведена в зазор між різцем 9 і підтримуючим роликом 11. Далі одночасно вмикають обертаний рух (із встановленою частотою) патрона 7 токарного верстата з оправкою та спіраллю шнека та рух поздовжньої подачі різцетримача 14 супорта токарного верстату з інструментом для проточування зовнішньої крайки спіралі шнека, що дозволяє забезпечити проточування зовнішньої крайки спіралі шнека по всій її довжині.

В таблиці 1 подано конструктивно-технологічні параметри операції проточування зовнішньої крайки спіралі шнека. Слід зазначити, що поздовжня подача різцетримача 14 супорта токарного верстату з інструментом для проточування зовнішньої крайки спіралі шнека повинна відповідати кроку відкаліброваної на першій операції спіралі шнека.

Третя операція - заточування зовнішньої крайки спіралі шнека. Вона є подібною до попередньої і конструктивно-технологічні параметри операції проточування зовнішньої крайки спіралі шнека, які представлені таблиці 1, є аналогічними для неї. Різниця полягає лише у використанні заточувального інструменту (рис. 2), на заміну

інструменту для проточування зовнішньої крайки спіралі шнека. Даний заточувальний інструмент включає державку 9, яка кріпиться у різцетримачі 14 супорта токарного верстату, до якої гвинтами 12 і 13 приєднані заточувальні елементи 10 та 11.

Таблиця 1 - Конструктивно-технологічні параметри операцій проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека

№	Частота обертання оправки, об/хв	Поздовжня подача інструменту, мм/об	Зовнішній діаметр спіралі, мм	Висота спіралі, мм	Товщина спіралі, мм	Висота ножів-подрібнювачів, мм
1	3...9	7...18	50	10...15	0,8...2,0	5...10
2	3...12	7...20	80	10...25	1,0...2,5	5...12
3	3...15	7...25	100	10...35	1,0...3	5...15
4	3...18	7...30	125	10...45	1,2...3,5	5...20
5	3...22	7...35	150	10...55	1,5...3,5	5...25
6	3...25	7...45	200	10...75	1,8...4,0	5...35
7	3...30	7...50	250	10...90	2,0...4,0	5...40

Джерело: розроблено авторами

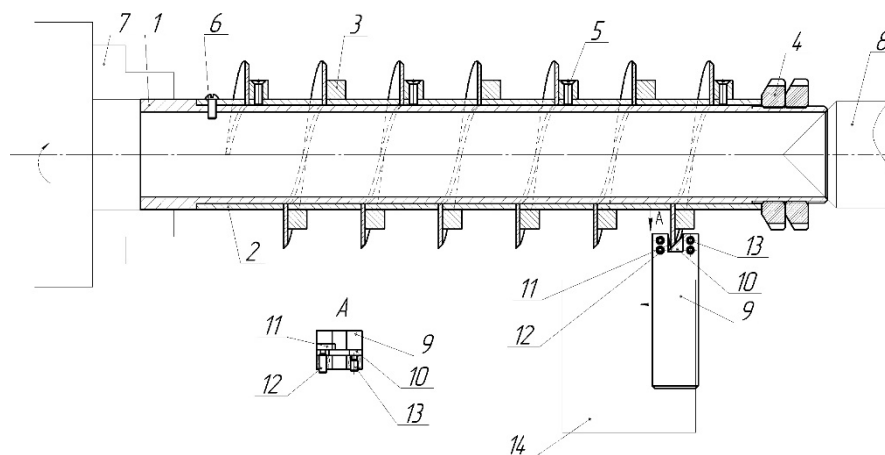


Рисунок 2 - Схема заточування зовнішньої крайки спіралі шнека

Джерело: розроблено авторами

Четверта операція - розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека на певну глибину з відповідним кроком з метою отримання заготовок під ножі-подрібнювачі. Вона передбачає розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека 9 (рис. 3), з певним кроком по усій її довжині, дисковими прорізними фрезами 11 (або абразивними прорізними кругами) на потрібну глибину з метою отримання заготовок під ножі-подрібнювачі 10. Відстань між дисковими прорізними фрезами 11 (або абразивними прорізними кругами) визначається шириною ножів-подрібнювачів. Інструменти встановлюються на шпинделі горизонтально-фрезерного (круглошліфувального) верстата. Оправка для затиску шнека закріплюється у патроні 7 ділильної головки та допоміжного центра 8 верстата.

Операція реалізується шляхом підведення дискових прорізних фрез 11 (або абразивних прорізних кругів) до початку оправки із закріпленим шнеком 9 і виставлення їх на відповідну глибину, яка відповідає висоті ножів-подрібнювачів 10. Потім вмикається обертовий рух шпинделя, на якому кріпляться прорізні фрези 11 (або абразивні прорізні круги), а також поздовжня подача стола верстата із ділильною

головкою, на якій закріплено оправку із шнеком. Це забезпечує виготовлення заготовок під ножі-подрібнювачі 10 по усій довжині зовнішньої крайки шнека 9.

Після здійснення першого переходу розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека 9 по усій її довжині, проводиться відвід оправки із шнеком 9 у вихідне положення. Далі проводиться провертання патрона 7 ділильної головки на необхідний кут, який відповідає кроку розташування ножів-подрібнювачів, і процес повторюється до моменту розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека 9 з певним кроком по усій її довжині.

У таблиці 2 подано конструктивно-технологічні параметри операції розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека.

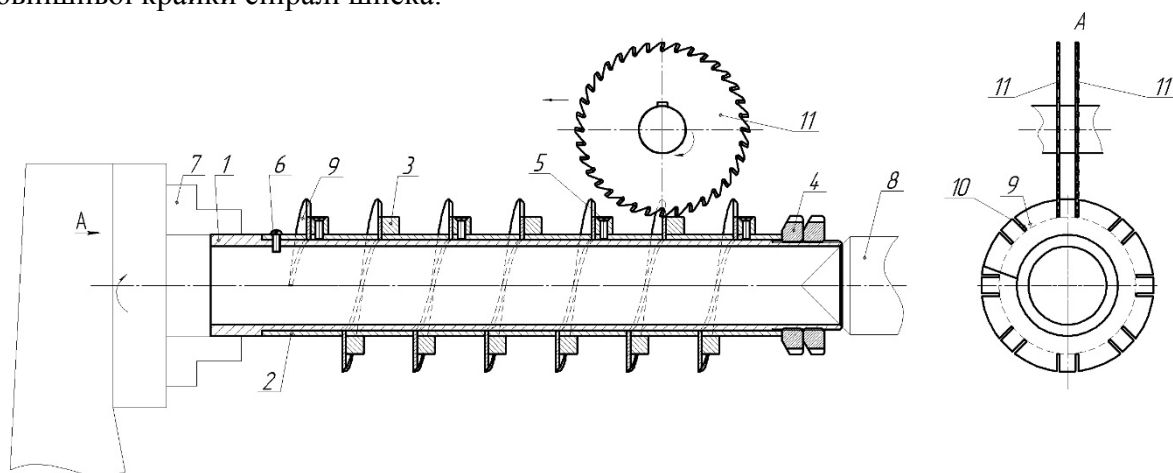


Рисунок 3 - Схема розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі

Джерело: розроблено авторами

П'ята операція - загинання ножів-подрібнювачів на спіралі шнека на певний кут. Ця операція передбачає загинання заготовок під ножі-подрібнювачі 9 роликem 11, який розміщено на радіальному підшипнику 12, що встановлений на опорі 13, яка закріплена через різьбове з'єднання 15 в державці 10, що встановлена у різцетримачі 14 супорта токарного верстату (рис. 4). Альтернативний варіант її виконання можливий з використанням горизонтально-фрезерного (круглошліфувального) верстату, шляхом закріплення оправки, аналогічно до попередньої операції, а ролика 11 на шпинделі горизонтально-фрезерного (круглошліфувального) верстату, але розглянемо варіант виконання на токарному верстаті.

Операція реалізується шляхом підведення ролика 11 до початок оправки із закріпленою спіраллю шнека 16 і виставлення його на відповідну глибину, яка відповідає куту нахилу ножів-подрібнювачів 9. Потім вмикається поздовжня подача різцетримача 14 супорта токарного верстату і проводиться загинання заготовок під ножі-подрібнювачі 9 по усій довжині зовнішньої крайки спіралі шнека 16. Після проходження першого переходу загинання зовнішньої крайки спіралі шнека 16 по усій її довжині проводиться відвід (за рахунок вмикання поперечної подачі) різцетримача 14 супорта токарного верстату з роликem 11 і його виставлення у вихідне положення (на початок оправки із закріпленою спіраллю шнека 16). Далі проводиться провертання патрона 7 токарного верстату на необхідний кут, який відповідає кроку розташування ножів-подрібнювачів 9, і процес повторюється до моменту загинання усіх ножів-подрібнювачів 9 на спіралі шнека 16. Причому, при необхідності є можливість

забезпечувати різностороннє загинання ножів-подрібнювачів 9 при виконанні даної операції.

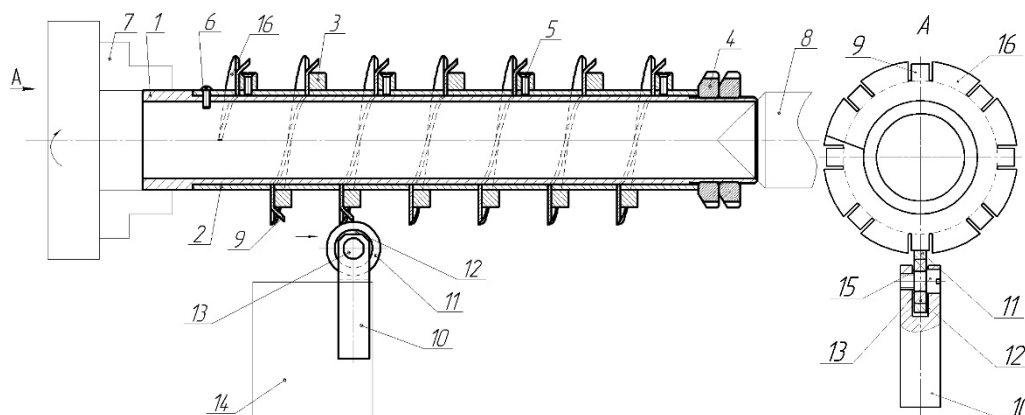


Рисунок 4 - Схема загинання ножів-подрібнювачів на спіралі шнека

Джерело: розроблено авторами

У таблиці 2 подано конструктивно-технологічні параметри операції загинання ножів-подрібнювачів на спіралі шнека на певний кут.

Таблиця 2 - Конструктивно-технологічні параметри операцій виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралі шнека

№	Частота обертання розрізного інструменту, об/хв	Подача розрізного інструменту (фрези), мм/зуб	Поздовжня подача ролика, мм/хв	Зовнішній діаметр шнека, мм	Кут нахилу ножів-подрібнювачів, град	Товщина спіралі, мм	Висота ножів-подрібнювачів мм
1	2800...11000	0,02...0,03	500...1000	50	1...90	0,8...2,0	5...10
2	2800...11000	0,02...0,03	500...1000	80	1...90	1,0...2,5	5...12
3	2800...11000	0,02...0,03	500...1000	100	1...90	1,0...3	5...15
4	2800...11000	0,02...0,03	400...900	125	1...90	1,2...3,5	5...20
5	2800...11000	0,02...0,03	400...900	150	1...90	1,5...3,5	5...25
6	2800...11000	0,02...0,035	300...800	200	1...90	1,8...4,0	5...35
7	2800...11000	0,025...0,035	300...800	250	1...90	2,0...4,0	5...40

Джерело: розроблено авторами

Шоста операція - калібрування спіралі шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами на встановлений крок (рис. 5). Вона виконується з використанням калібрувального клина 10, який вводиться у міжвитковий простір спіралі шнека 13 з подальшим розгинання на потрібний крок останньої. При цьому спіраль шнека 13, з виготовленими на ній ножами-подрібнювачами 9, прикріплюється до труби 1 клинами 4, 7 і гвинтами 6. Трубу 1 одним кінцем закріплено в патроні 7 токарного верстата, а іншим - встановлено в центрі 8 задньої бабки токарного верстата. Калібрувальний клин 10 встановлено на державці 11, яку закріплено в різцетримачі 14 супорта токарного верстату.

Процес реалізується шляхом підведення калібрувального клина 10 до початку спіралі шнека 13 і введенням його у її міжвитковий простір. Потім вмикається поздовжня подача різцетримача 14 супорта токарного верстату і проводиться калібрування спіралі шнека 13 по усій її довжині. Після завершення операції калібрування спіраль шнека 13 відкріплюється та знімається з труби 1 і використовується за призначенням.

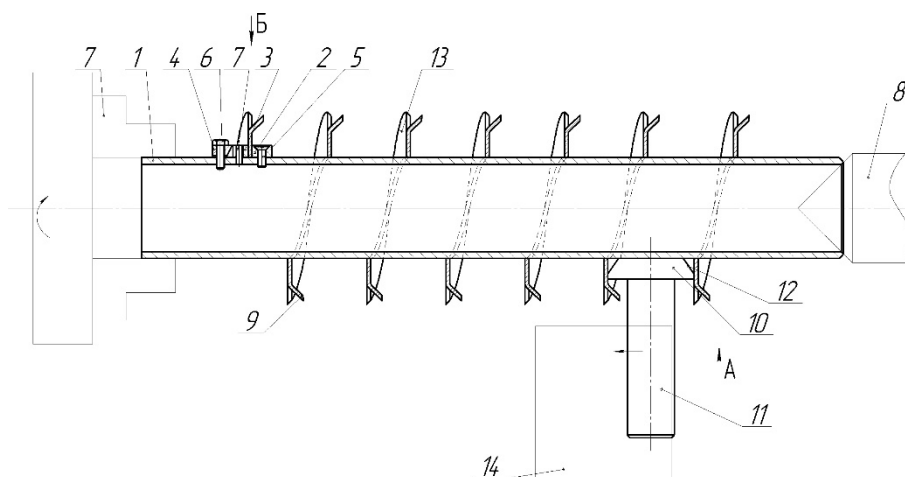


Рисунок 5 – Схема калібрування шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами
Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. Розроблено технологічний процес виготовлення ножів-подрібнювачів на навитих щільним пакетом на ребро спіралях шнеків з виконанням наступних базових операцій: калібрування навитої щільним пакетом на ребро спіралі шнека на певний крок; проточування зовнішньої крайки спіралі шнека; заточування зовнішньої крайки спіралі шнека; розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека на певну глибину з відповідним кроком з метою отримання заготовок під ножі-подрібнювачі; загинання ножів-подрібнювачів на спіралі шнека на певний кут; калібрування спіралі шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами на встановлений крок.

2. Розроблено схеми проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі, їх загинання, а також калібрування спіралі шнека з виготовленими ножами-подрібнювачами на потрібний крок.

3. Встановлено конструктивно-технологічні параметри операцій проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, а також конструктивно-технологічні параметри операцій виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралі шнека.

Список літератури

1. Hrytsai Yu. IN. Justification of the parameters of the combined screw conveyor-shredder of root crops: thesis ... technical college Sciences: special 05.05.11. Ternopil, 2020. 137 p.
2. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В. Моделювання роботи малогабаритного лопатево-гвинтового змішувача. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Вип. 6. Луцьк, 2000. С. 129-135.
3. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В., Гудь В.З., Дмитрів О.Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 84-93.
4. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
5. Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Драган А.П., Новосад І.Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей, Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 367 с.
6. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Гупка А.Б., Третяков О.Л. Технологічне проєктування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2025. 457 с.
7. Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval' Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies : Scientific Journal of TNTU. Ternopil.: TNTU, 2024. Vol 113. No 1. P. 5–15.
8. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проєктування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів // Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39). Част.2. С. 24-34.
9. Стібайло О.Ю. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41). Ч.2. С. 55-64.

10. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. Перспективні технології та прилади. 2021. Вип. 18. С. 112–123.
11. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
12. Васильків В. В. Л. Д. Радик, І. Б. Гевко Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату : Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»): «Наукові нотатки»; ЛДТУ. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
13. Hevko. I.B., Dyachun A.Ye., Lyashuk O.L., Martsenko S.V., Gypka A.B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2016, - Vol. 49, № 2, p.77-82.
14. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. Acta Technologica Agriculturae. Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2017. No. 2. P. 36–41. doi.org/10.1515/ata-2017-0007
15. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning // [Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka] – Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering, P. 385-394.
16. Hevko. I.B., Dyachun A.Ye., Hud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M. Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2015, Vol. 45, № 1, p.77-86.
17. Гевко І. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. Вісник ТНТУ, Тернопіль, 2011, Том 16. № 1, с.69-77.
18. Гурик О.Я. Гевко І.Б., Драган А.П. До питання моделювання геометрії робочих органів гвинтових змішувачів. Вісник ТДТУ, Тернопіль, 2002, Том 7, № 4, с. 54-60.
19. Feng Guang- liang, Bai Yin-shan. Some moulding ways of spiral vane. Coal Mine Machinery. 2006 Vol. 27 No. 9, p. 835-849.
20. Li Zheng Feng, Li Qiang Jiang. Design of combined helical blade manufacturing device. Advanced Materials Research. 2013. Vol. 753–755. P. 1386–1390. Crossref. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amr 753-755.1386. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR>

References

1. Hrytsai Yu. IN. Justification of the parameters of the combined screw conveyor-shredder of root crops: thesis ... technical college Sciences: special 05.05.11. Ternopil, 2020. 137 p. [in Ukrainian].
2. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Dmytriv, D. V. (2000). Modeliuvannia roboty malohabarytnoho lopatevohvintovoho zmishuvacha. Silskohospodarski mashyny: zb. nauk. statei.–Lutsk, 129-135. [in Ukrainian]
3. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Dmytriv, D. V., Hud, V. Z., & Dmytriv, O. R. (2020). Modeliuvannia zmishuvannia komponentiv hvyntovymy konveieramy-zmishuvachamy. Silskohospodarski mashyny, (45), 84-93. [in Ukrainian].
4. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. I. (2014). Naukovo-prikladni osnovi stvorennia gvintovikh transportno-tehnologichnikh mekhanizmv [Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms]. Ternopil: TNTU imeni Ivana Pulyuya.[in Ukrainian].
5. Hevko, B. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Drahan, A. P., & Novosad, I. Ya. (2008). Tekhnolohichni osnovy formoutvorennia spetsialnykh profilnykh hvyntovykh detalei. Ternopil: SMP “Taip. [in Ukrainian].
6. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). Tekhnolohichne proektuvannia ta vyhotovlennia hvyntovykh transportno-tehnolohichnykh robochykh orhaniv. FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
7. Hevko, I., Pik, A., Komar, R., Stibaylo, O., & Koval, S. (2024). Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. Scientific Journal of TNTU, 113(1), 5–15.
8. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., Stibailo, O. Yu., & Koval, S. O. (2023). Osoblyvosti konstruksii i tekhnolohichnoho proektuvannia robochykh orhaniv lopatevykh hvyntovykh zmishuvachiv. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 8(39, chast. 2), 24–34. [in Ukrainian]
9. Stibailo, O. Yu. (2024). Tekhnolohichni ta konstruktyvni osoblyvosti vyhotovlennia hvyntovykh elementiv silskohospodarskoi tekhniky. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 10(41, chast. 2), 55–64 [in Ukrainian].
10. Pylypets, M. I., Vasykiv, V. V., Radyk, D. L., & Pylypets, O. M. (2021). Peredumovy rozroblennia kombinovanykh operatsii vyhotovlennia hvyntovykh i shnekovykh zahotovok metodom obrobky metaliv tyskom. Perspektyvni tekhnolohii ta prylady, 18, 112–123. [in Ukrainian].
11. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubyniak, T. S., Navrotska, T. D., & Kruhlyk, O. A. (2019). Hnuchki hvyntovi konveieri: proektuvannia, tekhnolohiia vyhotovlennia, eksperymentalni doslidzhennia. FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
12. Vasykiv, V. V., Radyk, L. D., & Hevko, I. B. (2004). Tekhnolohichni ta konstruktyvni osoblyvosti vyhotovlennia hvyntovykh zahotovok z lystovoho prokату. Naukovi notatky LDTU, 14, 12–18. [in Ukrainian.]

13. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Lyashuk, O. L., Martsenko, S. V., & Gypka, A. B. (2016). Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 49(2), 77–82 [in English].
14. Rogatinskiy, R., Hevko, I., Gypka, A., Garmatyk, O., & Martsenko, S. (2017). Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agriculturae*, 2, 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007> [in English].
15. Hevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., & Hupka, A. (2021). Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021 (Vol. 1, pp. 385–394)* [in English].
16. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Hud, V. Z., Rohatynska, L. R., & Klendiy, V. M. (2015). Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 45(1), 77–86. [in English].
17. Hevko, I. (2011). Modeliuvannya kharakteru navantazhennia na hvyntovi robochi orhany. *Visnyk TNTU*, 16(1), 69–77. [in Ukrainian].
18. Huryk, O. Ya., Hevko, I. B., & Drahan, A. P. (2002). Do pytannia modeliuvannya heometrii robochykh orhaniv hvyntovykh zmishuvachiv. *Visnyk TDTU*, 7(4), 54–60. [in Ukrainian]
19. Feng, G.-L., & Bai, Y.-S. (2006). Some moulding ways of spiral vane. *Coal Mine Machinery*, 27(9), 835–849.
20. Li, Z. F., & Li, Q. J. (2013). Design of combined helical blade manufacturing device. *Advanced Materials Research*, 753–755, 1386–1390. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR753-755.1386>.

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Andrii Diachun**, Assoc. Prof., PhD, **Taras Dubynyak**, Assoc. Prof., PhD, **Oleg Stibailo**, **Andrii Gupka**, Assoc. Prof., PhD

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Technological Features of the Production of Shredder Knives on Screw Spirals

Screw working bodies equipped with chopper knives and similar blade elements are used in various sectors of the economy, such as construction, food and processing, mining, road construction, etc. Their use often provides a combination of various technological operations related to the transformation of agricultural and other products, in particular grinding, mixing and moving. However, they found the widest use in the means for the production of materials, compound feed and other agricultural feed for feeding cattle, pigs, other animals and poultry. And taking into account the significant costs of preparing fodder from root crops in animal husbandry, which include their grinding, the problem of making shredding knives on auger spirals is quite important.

The purpose of the work is the technological design of the manufacturing process of shredder knives on auger spirals. The production of chopper knives on screw spirals is a rather complex process that involves the performance of a certain set of multi-disciplinary operations. To date, separate technologies for the production of shredding knives on auger spirals have been developed. They provide for the production of shredding knives on screw spirals using hand tools and mechanized methods with preliminary cutting to a certain depth of the outer edge wound with a dense package on the edge of the screw spiral with subsequent bending of the shredding knives on it for use frame and roller equipped with special forming bushings. However, the developed processes are quite complex and require improvement. In order to reduce the energy consumption and labor intensity of the process of manufacturing shredder knives on screw spirals, we have proposed a new technological process.

A technological process for the production of shredder knives on auger spirals wound with a dense package on an edge has been developed with the following basic operations: calibration of an auger spiral wound with a dense package on an edge to a certain step; boring of the outer edge of the spiral of the auger; sharpening the outer edge of the screw spiral; cutting the outer edge of the auger spiral to a certain depth with the appropriate step in order to obtain blanks for shredding knives; bending the chopper knives on the auger spiral to a certain angle; calibration of the auger helix with manufactured shredder knives to a set pitch.

Schemes for boring and sharpening the outer edge of the auger spiral, cutting the outer edge of the auger spiral to obtain blanks for shredder knives, their bending, as well as calibration of the auger spiral with manufactured shredder knives to the required step have been developed.

Based on the need to manufacture chopper knives with a height of 5...40 mm on screw spirals with a diameter of 50...250 mm, the longitudinal feed of the lathe caliper should be at least a few millimeters greater than the specified height of the chopper knives. This is caused by the fact that when further bending of the chopper knives, their outer edge should not lie or touch the bend line of the chopper knives, which are made on the following sections. The need to ensure the required height of the chopper knives on the spirals of the screws determines the selection of the appropriate equipment (lathe) involved in further operations. Taking into account these limitations, the structural and technological parameters of the boring and sharpening of the outer edge of the auger spiral were established, as well as the structural and technological parameters of the operations for the production of chopper knives on the auger spiral.

chopper knives, auger spiral, screw working body, method, technology, technological process

Одержано (Received) 21.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

УДК 664.723.047

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.84-91](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.84-91)**В. В. Дуб**¹, доц., канд. техн. наук, **О. Г. Терешкін**², проф., д-р техн. наук,**В. М. Пазюк**³, доц., д-р техн. наук¹*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*²*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна*³*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: vvdub7@gmail.com, Tereshkin09@i.ua, vadim_pazuk@ukr.net*

Зниження енергоємності процесу подрібнення м'ясної сировини на підприємствах ресторанного господарства

Стаття присвячена оптимізації конструктивних параметрів ріжучих робочих органів подрібнювачів типу ніж-решітка, які використовуються в закладах ресторанного господарства, з метою зниження загальної енергоємності процесу подрібнення харчової сировини. У статі обґрунтовано використання в харчових цілях м'ясної сировини з підвищеним вмістом з'єднувальної тканини та розв'язується проблема істотних енергозатрат під час реалізації процесу подрібнення м'ясної сировини з підвищеними показниками міцності в ріжучих машинах (вовчках).

подрібнення, ріжучий механізм, ніж, решітка, вовчок, енергоспоживання

Постановка проблеми. М'ясо є одним із важливих продуктів у харчуванні людини. Воно виконує функції головного джерела постачання незамінних тваринних білків для організму людини [14]. Фаршеві кулінарні вироби з м'яса та процеси подрібнення м'ясної сировини отримали широке розповсюдження як на підприємствах ресторанного господарства, так і на підприємствах харчової промисловості. Найбільш розповсюдженим обладнанням для реалізації даного процесу є м'ясорубки (вовчки), які є відомими кожній домогосподарці, не говорячи вже про фахівців ресторанного господарства чи харчової промисловості. Першу м'ясорубку, наскільки відомо, винайшов у середині XIX століття німецький винахідник Карл Фрідріх Християн Людвіг барон Дрез фон Зауербронн (1785-1851), який знаменитий тим, що сконструював перший варіант всім відомого велосипеда. Бажаючи полегшити працю своїй дружині, австрійський винахідник Петер Міттерхофер (1822-1893) запропонував також подібну конструкцію для отримання фаршевої продукції [9]. Саме з цього моменту й стартував процес, який продовжується і сьогодні, а саме процес модернізації обладнання для отримання фаршу як з сировини тваринного, так і рослинного походження.

Одним з найбільш поширених процесів подрібнення харчової сировини на підприємствах ресторанного господарства є процеси отримання фаршевої продукції за допомогою м'ясорубок. Незважаючи на традиційність цих процесів та обладнання для їх реалізації їм притаманний ряд недоліків, один з яких – це неефективне подрібнення деяких видів м'ясної сировини, яка містять велику кількість жорсткої з'єднувальної тканини, що призводить до зниження якості фаршів і збільшення енергоємності та трудомісткості процесів подрібнення. Даний недолік є суттєвим при переробці яловичини. Хоча в Україні у 2024 році споживання яловичини на душу населення є меншим за обсягом в порівнянні з іншими видами м'яса, таким як свинина та свійська птиця, яка найбільше представлена курятиною, на які сумарно припадає близько 85% всього ринку м'яса в Україні [1], але дане співвідношення по завершенню війни, ми гадаємо, буде зміщено в бік яловичини.

© В. В. Дуб, О. Г. Терешкін, В. М. Пазюк, 2025

Проведений аналіз кулінарного використання туші яловичини свідчить про те, що при її переробці в закладах ресторанного господарства утворюється 3,2...3,4 % відходів, які представлені сухожиллями, хрящами, плівками й іншими видами відходів оброблення, зачищення та жилювання м'яса [7 С.12; 8]. Традиційні технології м'ясопродуктів ресторанного господарства не передбачають їхню переробку в харчових цілях у зв'язку з достатньо високими показниками міцності.

Сполучна тканина яловичини відрізняється високою механічною міцністю й еластичністю. Її міцність у 200 разів перевищує міцність м'язових волокон. Це є поширеною причиною відмови вовчків при переробці сухожилля. Сухожилля та плівки, згідно досліджень, мають межу міцності при розтяганні в 1000 разів більшу ніж для м'язових волокон і в 3...4 рази більшу ніж для яловичого м'яса з великим вмістом сполучної тканини. Опір різання різних груп м'язів яловичини складає 1,3...8,6 кН/м, а з'єднувальної тканини відповідно – 27...40 кН/м. При цьому модуль Юнга м'язів складає в середньому 2,6 МПа, а з'єднувальної тканини відповідно – 69,4 МПа. Напруга розриву становить 0,135 МПа для м'язової тканини і 6,75 МПа для з'єднувальної [6 С. 26].

Виходячи з вищезазначеного, яловичина з великим вмістом з'єднувальної тканини має підвищені показники, міцності, що призводить до збільшення питомої роботи різання при подрібненні даної сировини і як наслідок до збільшення енергоємності процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням удосконалення проведення процесу подрібнення м'ясної сировини на підприємствах ресторанного господарства присвячено значну кількість праць провідних науковців, зокрема різні аспекти цієї проблеми досліджували наступні вітчизняні вчені: О.І. Некоз, О.В. Батраченко, С.О. Некоз та ін. [10, 2, 12]. Але в переважній більшості науковців вивчали та вирішували проблеми довговічності та надійності ріжучого механізму вовчків.

Також удосконаленням процесу подрібнення з використанням ріжучого механізму ніж-решітка займалась науковця Філімонова Н.В. [16], але удосконалення запропоноване нею реалізувалось шляхом узгодження способів подачі м'ясної сировини до різального вузла та оптимізації конструкції елементів різального комплексу з даною метою.

Оптимізацією ріжучих робочих органів м'ясорубок на підприємствах ресторанного господарства займався також Гончаренко Г.М. [5], але метою даних досліджень було створення ріжучого робочого механізму здатного реалізувати процес безвідходної переробки овочів на підприємствах ресторанного господарства.

Виходячи з вищезазначеного проблема зниження енергоємності процесу подрібнення на м'ясорубках в закладах ресторанного господарства є актуальною

Метою статті є розробка конструктивних рішень націлених на зниження енергоємності процесу подрібнення м'ясної сировини на підприємствах ресторанного господарства.

Виклад основного матеріалу. Перш ніж вирішувати питання зниження енергоємності процесу подрібнення м'ясної сировини з підвищеним вмістом з'єднувальної тканини необхідно визначити доцільність подрібнення проаналізувавши її харчову цінність.

Аналіз морфологічної структури яловичини показує, що сполучна тканина становить 9...14% маси туші [15 С.63; 3 С.10]. Основою сполучної тканини є колагенові та еластинові волокна, які представляють собою фібрилярні білки. Колаген – найбільш поширений представник групи протеїноідів, на частку якого припадає близько 30% всіх білків тваринного організму [13]. Особливістю сполучної тканини

яловичини є її висока гідротермічна стійкість, тому вона потребує особливий режим її обробки. Зокрема, при переробці певних частин туші яловичини, з великим вмістом сполучної тканини, широко використовують процеси подрібнення для наступної реструктуризації м'язової, сполучної та жирової тканин. До таких частин відноситься, у першу чергу, м'якоть шийної частини, пашина, покромка та обріз, який утворюється при обробленні туш. Вищезазначені частини туші традиційно використовують як котлетне м'ясо. Крім вище перелічених частин туші яловичини, які містять суттєву кількість з'єднувальної тканини (за стандартом не повинно перевищувати 5 % за масою), при переробці туш утворюється біля 3,5 % відходів, що складаються з плівок, кровоносних і лімфатичних судин, хрящів, сухожиль та інших відходів обробки, жилування та зачищення. Згідно з нашими розрахунками дана група нетрадиційної м'ясної сировини приблизно містить до 25...30 % білків і до 7...15 % жирів, що характеризує її як висококонцентрований харчовий продукт. Дана група сировини складається в основному із сполучної тканини (до 80 %) з невеликим вмістом м'язової і жирової тканин. Отже основні технологічні характеристики цієї сировини залежать від складу та структури сполучної тканини, а вона складається з колагенових та еластинових волокон. Пучки колагенових та еластинових волокон разом з речовиною, що об'єднує їх в одне ціле та складається з білкового полісахаридного комплексу, утворюючи плівки ендомізія та перимізія [4].

Певне коло науковців вважає, що з'єднувальна тканина м'яса має невисоку біологічну цінність, тому що не містить деяких незамінних амінокислот. Проте, як свідчать інші дослідження, було встановлено, що збільшення до певної межі частки білків з'єднувальної тканини у м'ясопродуктах не призводить до зниження їхньої біологічної цінності. Так, клінічні спостереження показали, що збільшення в яловичині частки білків з'єднувальної тканин (гідролізованого колагену) призводить до підвищення біологічної цінності харчових продуктів виготовлених з цієї м'ясної сировини. На сьогодні проведено дослідження, в яких встановлено, що підвищення вмісту в м'ясі колагену до 15% від загальної маси м'яса призводить до збільшення збалансованості сумарного амінокислотного складу білків м'яса. Тому не можна однозначно стверджувати, що харчова й біологічна цінність м'яса яловичини з підвищеною кількістю з'єднувальної тканини (наприклад, лопаткова та тазостегнова частини туші, у яких вміст колагену та еластину сягає 9...12%), поступається іншим частинам туші [3 С.13].

Тож виходячи з вищезазначеного можна стверджувати, що з'єднувальна тканина яловичини є високоцінною харчовою сировиною, яку доцільно переробляти в харчових цілях. Одним з напрямків використання такої сировини в закладах ресторанного господарства це переробка її для січених напівфабрикатів за допомогою м'ясорубок.

Основним конструктивним елементом м'ясорубки (вовчка) є його ріжучий механізм. Ефективність його роботи, складається з багатьох факторів: комплектності, конструкції окремих елементів, матеріалу, ступеня їхнього затягування і зносу, класу обробки бічних поверхонь ріжучого механізму, структурно-механічних властивостей продукту, що подрібнюється, технологічного призначення процесу та ряду інших факторів.

В результаті проведеного аналізу низки досліджень можна зазначити, що найбільш істотно на питому роботу різання впливає кут заточення ріжучих країв лез ножів та країв отворів решіток при подрібненні харчової сировини, що має достатньо високі показники міцності. Вищезазначене обґрунтовує доцільність модернізації ріжучих робочих органів з метою зниження енергоємності процесу подрібнення саме такої харчової сировини тобто з високими показниками міцності.

Аналізуючи залежність питомої роботи різання від кутів заточення країв отворів ножових решіток та ріжучих країв ріжучих лез ножів при подрібненні м'ясного обрізу, можна зазначити, що для цієї сировини в залежності від вмісту еластинових та колагенових волокон при зміні кута заточення від 15° до 90° питома робота змінюється в 2...6 раз, найменш енергозатратним є процес подрібнення при використанні ножових решіток та ножів з кутами заточення країв отворів решіток та ріжучих країв лез ножів 15° . Але слід відзначити, що ножі та решітки з даним кутом заточення мають досить низькі показники довговічності та надійності в зв'язку з їх малою зносостійкістю. Цю думку підтримують також інші науковці [11], які не рекомендують використовувати ножі та решітки з кутами заточення ріжучих країв лез ножів та отворів решіток менше ніж 30° .

Слід також відзначити, що питома робота різання менш суттєво залежить від зміни кутів заточення, так як тангенс середнього кута підйому дотичної, який характеризує швидкість зміни питомої роботи різання в залежності від зміни кута заточення, на даному інтервалі складає в середньому 0,5. Цей же показник на інтервалі кутів заточення $30...90^\circ$ складає вже 1,73. Порівнюючи значення тангенсів кута підйому дотичних до функцій залежності питомої роботи різання від кутів заточення країв отворів та ріжучих країв лез ножів, можна зазначити що швидкість зміни питомої роботи різання на інтервалі кутів заточення $30...90^\circ$ майже в 3,5 рази більше ніж на інтервалі $15...30^\circ$.

Враховуючи вищезазначене та низьку міцність (для ножів) та зносостійкість ми не рекомендуємо при виготовленні деталей ріжучого механізму подрібнювачів з традиційних матеріалів, виготовляти ріжучі робочі органи з кутами заточення країв отворів решіток та лез ножів менше ніж 30° . На інтервалі кутів заточення $30...90^\circ$ функція залежності питомої роботи різання від кутів заточення ріжучих робочих органів майже лінійна. Тому рекомендуючи верхню межу діапазону бажаних кутів заточення, визначальним критерієм є зменшення абсолютного значення роботи різання вдвічі. При значенні кутів заточення країв отворів решіток та ріжучих країв лез ножів рівним приблизно 45° абсолютне значення питомої роботи різання при подрібненні м'ясного обрізу зменшується майже вдвічі.

З метою підвищення ефективності процесу подрібнення даного виду сировини необхідно знижувати енергоємність процесу їх руйнування безпосередньо в площині різання ріжучого механізму. Нами рекомендовано для зниження питомої роботи різання високоміцних продуктів використовувати ріжучі робочі органи з гострими кутами заточення ($30...45^\circ$) ріжучих робочих країв лез ножів та країв отворів ножових решіток.

Для виготовлення ріжучого механізму з вибраними кутами заточення розроблені та виготовлені універсальні ножі (рис. 1), що мають одночасно тупі та гострі ріжучі краї ріжучі краї лез, і два види ножових решіток з гострим (рис. 2) та тупим кутами заточення країв отворів решіток. Реалізація процесу подрібнення з ріжучими робочими органами, що мають тупі кути заточування країв лез ножів та решіток доцільна при подрібненні маломіцної харчової сировини (наприклад варені овочі) з метою отримання більшої дисперсності фаршів.

Пера лез універсальних ножів конструктивно виготовлені у вигляді нагнітаючих лопатей. Таке виконання ножів з перами у вигляді нагнітаючих лопатей, забезпечує додаткове нагнітання продукту між ножами та решітками, що значно знижує опір ріжучих пар та підвищує продуктивність пристрою, а також спонукає додатковому перемішуванню сировини між ножовими решітками, що підвищує якість фаршу, який отримується. Таке конструктивне виконання також дозволяють максимально збільшити коефіцієнт використання площі отворів ножових решіток (тобто максимально

збільшити кількість отворів решіток, відкритих для проходження продукту, так як форма ножів у вигляді нагнітаючих лопатей не закриває отвори усім своїм тілом, а перекривається тільки незначна частина отворів решітки у місці їх контакту з опорними гранями лез ножа). Підвищення коефіцієнту використання площі отворів ножових решіток забезпечує підвищення продуктивності пристрою.

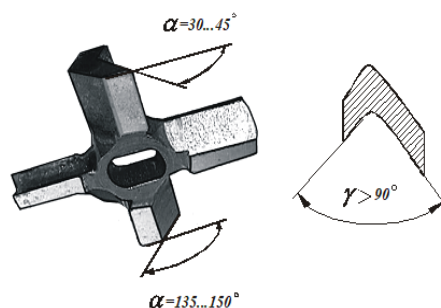


Рисунок 1 – Ніж універсальний та перетин леза ножа універсального «розроблено авторами»

Джерело: розроблено авторами

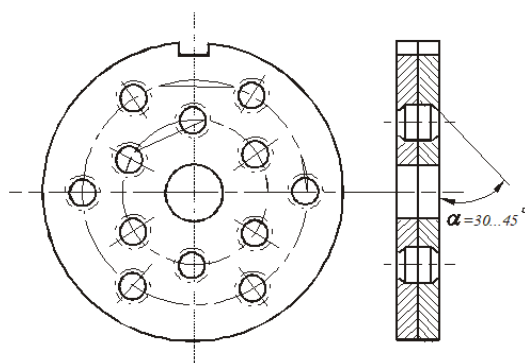


Рисунок 2 – Ножова решітка з гострим кутом заточення «розроблено авторами»

Джерело: розроблено авторами

Утворений нагнітаючою лопаттю та робочою гранню одного із лез кут γ (рис. 1) має бути не менше 90° , для того щоб у ньому не створювались «застійні» зони сировини, що подрібнюється, а вся маса, що подрібнюється рівномірно перемішувалась у зазорах між ножовими решітками та протискалась між ними.

Оптимальне значення кута нахилу нагнітаючих лопатей ножа до ножової решітки складає $30...45^\circ$, так як його збільшення (більше 45°) істотно знижує нагнітаючий ефект лопатей, а зменшення кута нахилу (менше 30°) суттєво знижує ефективність перемішування сировини лопаттю, а також знижує можливість зменшення кута заточування одного із лез ножа (так як кут між робочою гранню леза та нагнітаючою лопаттю не повинен бути менше 90°). Окрім того, суттєве зменшення кута нахилу буде спричиняти зменшенню коефіцієнта використання площі отворів ножових решіток (фактично сама лопать буде перекривати отвори решіток). Треба зазначити також, що кут нахилу нагнітаючих лопатей дорівнює куту заточення ріжучого краю.

Ножові решітки з гострим кутом заточення (рис. 2) технологічно доцільно виготовляти з двох частин, а в якості вихідної можна використовувати лише одну частину ножової решітки, що зменшить затрати потужності на продавлювання продукту крізь отвори вихідної решітки.

Використання таких оптимізованих робочих органів зменшує питому роботу різання продуктів, що й призводить до загального зниження енергоємності процесу подрібнення харчової сировини з підвищеними показниками міцності.

Аналізуючи результати низки проведених нами дослідів (рис. 3) слід відзначити те, що найбільш енергоємним видом сировини, щодо подрібнення є м'ясний обріз. Питома робота різання в залежності від конструктивного виконання комплексу ріжучих робочих органів і процентного вмісту в ній волокон грубої з'єднувальної тканини в 1,5...2,5 рази перевищує аналогічний показник для звичайного котлетного м'яса у 2...4 рази.

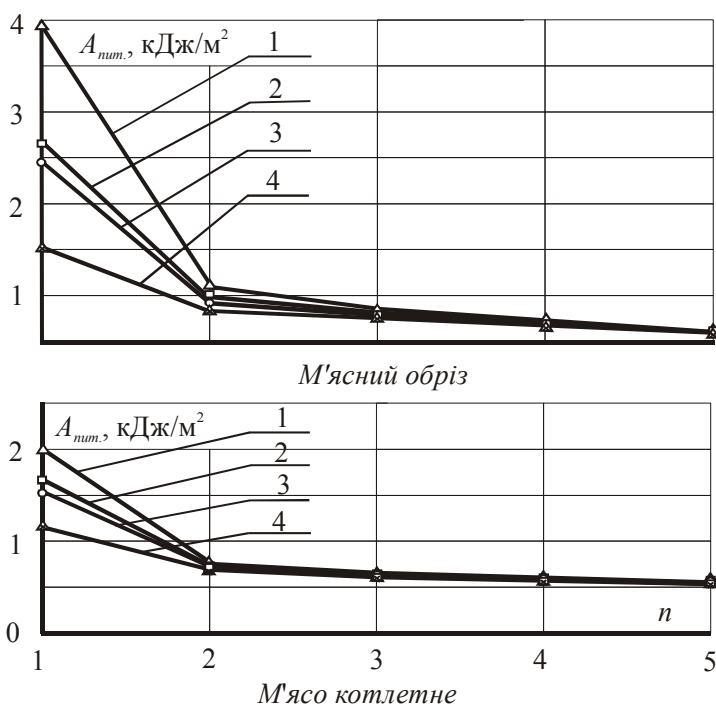


Рисунок 3 – Залежність питомої роботи різання (A_{nut}) яловичини від кількості подрібнень (n) та геометричних параметрів робочих органів:

1 – традиційні робочі органи; 2 – традиційний ніж та решітка з гострим кутом (30°) заточування країв отворів; 3 – ніж з гострим кутом заточування країв лез та традиційна решітка; 4 – ніж з гострим кутом заточування країв лез та решітка з гострим кутом (30°) заточування країв отворів.

Джерело: розроблено авторами

Висновки. В результаті використання розроблених ножів і решіток з гострими кутами заточення країв лез ножів і отворів для м'ясної сировини з підвищеним вмістом високоміцної з'єднувальної тканини (еластиновими та колагеновими волокнами) отримано істотне зниження зусилля та роботи різання. У порівнянні зі стандартними ріжучими робочими органами ніж-решітка використання модернізованих ріжучих робочих органів, дозволяє в 2...3 рази зменшити питому роботу різання м'ясного обрізу. При цьому заміна в стандартному комплекті тільки однієї решітки на модернізовану знижує роботу різання в середньому в 1,6 рази, а при використанні модернізованого ножа в парі зі звичайними решітками – у 1,8 рази.

Розроблено конструкцію ножа для м'ясорубок з гострим кутом заточення ріжучого краю леза, лопаті якого виготовлені у вигляді нагнітаючих лопатей, що значно знижує опір ріжучих пар та дозволяють максимально збільшити коефіцієнт використання площі отворів ножових решіток (тобто максимально збільшити кількість отворів решіток, відкритих для проходження продукту, так як форма ножів у вигляді нагнітаючих лопатей не закриває отвори усім своїм тілом, а перекивається тільки

незначна частина отворів решітки у місці їх контакту з опорними гранями лез ножа). А також розроблені та виготовлені ножові решітки з гострим кутом заточення, які виготовляють з двох частин, що зменшує витрати потужності на потискання м'ясної сировини крізь отвори вихідної решітки. Використання такої ріжучої пари в існуючих конструкціях м'ясорубок в закладах ресторанного господарства дозволяє зменшити питоме енергоспоживання на 10...18% при подрібненні м'ясної сировини з великим вмістом з'єднувальної тканини.

Список літератури

1. Аналіз ринку яловичини в Україні. 2024 рік. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-govyadiny-v-ukraine-2024-god> (дата звернення: 25.11.2024).
2. Батраченко О. В. Підвищення ефективності роботи та довговічності м'ясорізальних машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Вінниця, 2014. 284 с.
3. Безвідходна переробка м'яса з високим вмістом сполучної тканини з використанням ультразвуку: монографія / Г. В. Дейниченко та ін., – Харків: Факт, 2012. 196 с.
4. Використання колагеномісткої сировини м'ясної промисловості : монографія. Янчева М. О., Крайнюк Л. М., Скуріхіна Л. А., Дроменко О. Б. Харків: ХДУХТ, 2010. 148 с.
5. Гончаренко Г. М. Розробка процесів безвідходної переробки томатних овочів на підприємствах харчування : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Харків, 2004. 263 с.
6. Дейниченко Г. В., Простаков О. О., Дуб В. В. Удосконалення процесів переробки м'ясної сировини в підприємствах харчування : монографія. Харків : Студцентр, 2003, 349 с.
7. Дуб В. В. Вдосконалення процесу подрібнення харчової сировини та обладнання для його реалізації на підприємствах харчування : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Харків, 2002. 193 с.
8. Дуб В. В., Лебединець І. В., Косецька Я. Е. Розробка напрямів оптимізації процесів подрібнення харчової сировини в ресторанному господарстві. *Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність* : тези Міжнар. наук.-практ. конф., 14 травня 2020 р. Харків: ХДУХТ, 2020. Ч. 1. С. 203-204.
9. Дюкарева Г. М., Дуб В. В., Дуб А. В. Вплив конструктивних параметрів м'ясорубок на товарознавчі властивості січених м'ясних напівфабрикатів і виробів із них. *Збірник наукових праць Харківського державного університету харчування та торгівлі. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі*. 2016. Вип. 2 (24). С. 311–321.
10. Некоз О. І., Батраченко О. В., Філімонова Н. В. Перспективні шляхи підвищення питомої продуктивності вовчків. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. № 1 (257). С. 251–255
11. Некоз О. І., Батраченко О. В. Проектування м'ясорізальних вовчків : навч. посіб. Черкаси: ЧДТУ, 2014, 221 с.
12. Некоз С. О. Підвищення ефективності роботи і довговічності різального комплексу м'ясорізальних вовчків : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Київ, 2001. 165 с.
13. Ощипок І. М., Криńska Н. В. Застосування ферментованої колагенвмісної сировини при виготовленні ковбасних фаршів. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького*. 2015. № 4. С. 91–96.
14. Сегеда С.А. Статистичний аналіз споживання м'яса та м'ясопродуктів в Україні *Економіка АПК*, 2020. № 3 С. 36–46 URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202003036> (дата звернення: 25.11.2024).
15. Технологія м'яса та м'ясних продуктів: підручник / М. М. Клименко та ін., – Київ: Вища освіта, 2006. 640 с.
16. Філімонова Н. В. Підвищення ефективності роботи вовчків шляхом узгодження подачі та процесу подрібнення м'ясної сировини : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Черкаси, Харків, 2017. 226 с.

References

1. *Analysis of the beef market in Ukraine. 2024 year.* (n.d.). <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-govyadiny-v-ukraine-2024-god> [in Ukrainian].
2. Batrachenko O.V. (2014) *Increasing the efficiency and durability of meat cutting machines*. Candidate's thesis. Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].
3. Deinychenko H.V., Postnov H.M., Chekanov M.A. et al. (2012). Waste-free processing of meat with a high content of connective tissue using ultrasound. Kharkiv: Fakt [in Ukrainian].
4. Yancheva M. O., Krainiuk L. M., Skurikhina L. A. et al. (2010). *Use of collagen-rich raw materials of the meat industry*. Kharkiv: KhDUKhT [in Ukrainian].
5. Honcharenko G.M. (2004). *Development of waste-free processing of tomato vegetables at food enterprises*. Candidate's thesis. Kharkiv: KhDUKhT [in Ukrainian].

6. Deinychenko H.V., Prostakov O.O., Dub V.V. (2003). Improvement of meat processing processes in food enterprises. Kharkiv: Studtsentr [in Ukrainian].
7. Dub V.V. (2002). *Improvement of the process of grinding food raw materials and equipment for its implementation at food enterprises*. Candidate's thesis. Kharkiv: KhDUKht [in Ukrainian].
8. Dub V.V., Lebedynets I.V., Kosetska Ya.E. (2020). Development of directions for optimization of processes of grinding food raw materials in the restaurant business. *Rozvytok kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho ta hotelnoho hospodarstv i torhivli: problemy, perspektyvy, efektyvnist* : Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia. Abstracts of Papers (pp. 203-204). Kharkiv: KhDUKht [in Ukrainian].
9. Diukareva H.M., Dub V.V., Dub A.V. (2016). The influence of the design parameters of meat grinders on the marketing properties of chopped meat semi-finished products and their products. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho hospodarstva i torhivli*, 2 (24), 311-321 [in Ukrainian].
10. Nekoz O.I., Batrachenko O.V., Filimonova N.V. (2018) Promising ways of increasing the specific productivity of meat meal. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu* 1 (257), 251-255 [in Ukrainian].
11. Nekoz O.I., Batrachenko O.V. (2014) Design of meat grinders. Cherkasy: ChDTU [in Ukrainian].
12. Nekoz S.O. (2001). *Increasing the work efficiency and durability of the cutting set of the meat cleavers*. Candidate's thesis. Kyiv: UDUHT [in Ukrainian].
13. Oshchypok I. M., Krynska N. V. (2015). The use of fermented collagen-containing raw materials in the production of minced sausages. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho*. 4, 91-96 [in Ukrainian].
14. Sehedra S.A. (2020). Statistical analysis of consumption of meat and meat products in Ukraine. *Ekonomika APK*, 3, 36-46. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202003036> [in Ukrainian].
15. Klymenko M.M., Vinnikova L.H., Bereza I.H. at al. (2006). *Technology of meat and meat products*. M.M. Klymenko. (Ed.). Kyiv: Vyshcha osvita [in Ukrainian].
16. Filimonova N.V. (2017) *Increasing the efficiency of the meat grinder by coordinating the feeding and grinding process of meat raw materials*. Candidate's thesis. Cherkasy, Kharkiv: ChDTU, KhDUKht [in Ukrainian].

Volodymyr Dub¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Tereshkin**², Prof., DSc., **Vadym Paziuk**³, Assoc. Prof., DSc.

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Kharkiv National University named after V.N. Karazin, Kharkiv, Ukraine

³Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Reducing the Energy Intensity of the Process of Grinding Raw Meat at Restaurant Enterprises

The article is devoted to the optimization of the design parameters of the cutting working parts of the knife-lattice type shredders, which are used in restaurants, with the aim of reducing the overall energy consumption of the process of grinding food raw materials.

Today, the processes of grinding food raw materials with the help of shredders of the knife-grid type have found wide application at enterprises of the restaurant industry. Such minced meat products as cutlets, meatballs, casseroles, schnitzels, zrazy, rolls, cabbage rolls, dumplings, chevapchichi, dolma, khinkali, manti, pleskavitsa, cannelloni, klopsa, Dutch croquettes, Italian polpette, Japanese tsukune and many others is an integral component of the world cuisines and the menu of various restaurants in Ukraine and abroad. Despite the diversity of minced meat culinary products in restaurant technologies and the rather «respectable» history of equipment for obtaining minced meat, grinding processes are quite energy-consuming and require research on their optimization. This article also substantiates the use of meat raw materials with a high content of connective tissue for food purposes and solves the problem of significant energy consumption during the implementation of the process of grinding meat raw materials with increased strength indicators in cutting machines (meat grinders). The article also defines the directions for optimizing the structural parameters of the hardware design of this process with the calculation of its reduction in energy intensity.

The proposed constructive solutions refer to the improvement of the cutting working parts of the knife-grid type shredders, the work of which is a determining factor in relation to the productivity of the blades and affects the overall energy consumption of the grinding process. The article also presents the developed technology for manufacturing optimized cutting working devices. As a result of the use of modernized cutting working parts, a reduction in the specific work of cutting meat raw materials with a high content of connective tissue was obtained, which in general leads to a decrease in specific energy consumption by 10...18%.

grinding, cutting mechanism, knife, grid, meat grinders, energy consumption

Одержано (Received) 22.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

Д. О. Мітєв, В. М. Кропівний, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: mitevdima@gmail.com

Методичні основи створення вимірювального комплексу для реєстрації сигналів акустичної емісії при механічній обробці

Представлено методичні основи створення вимірювального комплексу для реєстрації сигналів акустичної емісії під час механічної обробки металів. Розглянуто принципи виникнення акустичної емісії та їх зв'язок із параметрами різання, що дозволяє здійснювати моніторинг стану інструмента та оптимізувати технологічний процес. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність використання акустичної емісії для своєчасного виявлення перевантажень і прогнозування зносу, відкриваючи перспективи для впровадження автоматизованих систем контролю процесу механічної обробки металевих матеріалів.

акустична емісія, механічна обробка, п'єзоелектричний датчик, підсилювач сигналів, аналого-цифровий перетворювач, спектральний аналіз, амплітудний аналіз, онлайн-моніторинг

Постановка проблеми. В умовах сучасного машинобудування та металообробки гостро постає завдання підвищення ефективності виробничих процесів, зокрема процесів точіння, фрезерування та свердління. Новітні алгоритми цифрової обробки сигналів, зокрема методи спектрального аналізу, дозволяють забезпечити ефективну діагностику процесу різання. Одним із перспективних підходів до діагностики та контролю стану процесу різання металів є використання результатів вимірювання акустичної емісії (АЕ). Акустична емісія є явищем випромінювання високочастотних коливань у твердих тілах під час їх структурної перебудови в процесі пружної деформації, зародження й поширення тріщин, тертя та пластичного плину. Процеси стружкоутворення при механічній обробці металевих матеріалів завжди супроводжуються виникнення АЕ.

Для механічної обробки металів важливо розуміти, коли і за яких умов у зоні різання виникає максимальний рівень акустичних сигналів, адже це може свідчити про надмірне навантаження на інструмент, пластичне зсування, зародження та розвиток мікротріщин. У дослідженнях, присвячених діагностиці процесу різання за допомогою АЕ, встановлено, що характер та інтенсивність сигналів АЕ можуть корелювати з такими параметрами, як швидкість різання, глибина різання, подача, стан інструмента, дія мастильно-охолоджувальних рідин, механічні властивості заготовки тощо. Аналіз сигналів АЕ дає можливість проводити моніторинг дотримання оптимальних умов різання, наявності пористості та дефектів термічної обробки тощо.

Актуальність даної роботи зумовлена потребою в удосконаленні методів контролю АЕ для управління процесами механічної обробки конструкційних металів з метою отримання деталей зі стабільною надійністю та точністю. Дослідження частоти та амплітуди сигналу АЕ в діапазоні 100–700 кГц, що виникає при деформуючому проникненні ріжучої кромки інструменту в оброблюваний матеріал, є важливою задачею як з наукової, так і з практичної точки зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Акустична емісія (АЕ) – це явище випромінювання хвиль пружної деформації в твердому тілі, які виникають унаслідок

внутрішніх процесів руйнування чи переміщення дислокацій та їх двійникування, протікання фазових перетворень..

Основні причини виникнення АЕ у металевих матеріалах з розвитком наступних процесів:

- пластична деформація (рух і взаємодія дислокацій) в кристалічних матеріалах;
- утворення мікротріщин та їх розповсюдження;
- тертя та стирання контактуючих поверхонь;
- процеси перебудови кристалічної ґратки та утворення в мікроструктурі нових фаз.

Процес різання металів полягає у локальному пластичному та/або пружному деформуванні шару металу ріжучим інструментом з метою відокремлення стружки. При контакті інструмента з металевою заготовкою у зоні різання виникають:

- деформація зсуву та пластична деформація. Рух дислокацій у кристалічній решітці металу призводить до виникнення високочастотних коливань.

- тертя і мікроудари між поверхнею різця та стружкою; зокрема, в зоні тертя можуть утворюватися локальні «нарости» з наступним їх руйнуванням, що є джерелом АЕ.

- утворення мікротріщин на кромці інструмента та у поверхневих шарах заготовки. Особливо це помітно при чорновій обробці високоміцних матеріалів чи при обробці зі значними ударними навантаженнями.

При цьому в зоні контакту між ріжучою кромкою та заготовкою виникають значні напруження й температури, а також можливі структурні зміни матеріалу. Процес стружкоутворення супроводжується мікроруйнуваннями в зоні різання, переміщенням дислокацій, пластичними зсувами, процесами тертя, утворенням сигналів акустичної емісії. У процесі різання металів має місце інтенсивне теплоутворення [1–3]. Високе механічне та теплове навантаження на інструмент та заготовку створює суттєвий вплив на фазові та мікроструктурні перетворення, зміну фізико – механічних властивостей матеріалу в мікрооб’ємах обробленої поверхні заготовки, що суттєво впливає на параметри АЕ [4–6]. Спосіб механічної обробки (з використанням мастильно-охолоджуючої рідини або без неї, різні геометрії різця, різні марки матеріалу твердосплавних пластин) суттєво впливають на параметри АЕ. Зокрема, охолодження зменшує температуру в зоні різання, що знижує інтенсивність пластичної деформації та тертя. Унаслідок цього зменшується загальний рівень амплітуди АЕ, тоді як піки у спектрі можуть ставати чіткішими, що пов’язано зі зменшенням фонових шумів від тертя.

За даними низки досліджень [7–9], основний діапазон частот АЕ при різанні металів лежить у межах 100–700 кГц. Саме в цьому діапазоні переважно відбуваються коливання, пов’язані зі згаданими механізмами руйнування та деформації. Амплітуди сигналів можуть варіюватися залежно від:

- твердості, в’язкості та суцільності матеріалу;
- геометрії робочої частини різального інструмента;
- швидкості різання і подачі.

На характеристики акустичної емісії при основних способах обробки різанням основний вплив створюють параметри режиму різання:

- зі зростанням швидкості різання збільшується швидкість утворення та видалення стружки, що посилює процеси пластичної деформації та тертя. Це може спричиняти зміщення основного спектру АЕ у вищу частотну зону [10];

- при збільшенні глибини різання збільшується об’єм деформованого матеріалу, що зумовлює підвищення інтенсивності сигналів АЕ та їх амплітуди;

- збільшення подачі призводить до зростання поперечного перерізу зрізуваної стружки, а також до збільшення сили різання та інтенсивності деформування;

- затуплення інструмента або наявність мікрОВикришувань ріжучої кромки сприяє нерівномірному тертю та збільшенню амплітуди АЕ.

Сучасні методи аналізу АЕ базуються на використанні п'єзоелектричних датчиків високої чутливості, що встановлюються на інструмент або деталь (заготовку). Датчики конвертують пружні коливання в електричні сигнали, які потім піддаються підсиленню, фільтрації та аналізу. Для обробки сигналів АЕ застосовують методи спектрального аналізу (метод Фур'є), вейвлет-аналіз, часово-амплітудний аналіз [11–13]. Важливою особливістю вимірювальних систем для АЕ є високочастотний діапазон (зазвичай від десятків до сотень кГц), а також необхідність захисту від завад та попередження втрат сигналу при його передаванні від сенсора до реєструючої апаратури [14]. Висока частота сигналів АЕ дозволяє виключити вплив на результати вимірювань низькочастотних коливань, ударних процесів та вібрацій, які утворюються при роботі механізмів механообробного обладнання.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка методики та експериментальної установки для дослідження спектру акустичної емісії, що виникає у зоні різання металу та встановлення залежності частотно-амплітудних характеристик сигналів АЕ від особливостей механічної обробки та умов і режимів різання.

Виклад основного матеріалу. До основних завдань розробки відноситься:

1. Розробка вимірювального комплексу для реєстрації сигналів АЕ від ріжучого інструмента чи оброблюємої заготовки в залежності від виду обробки.

2. Проведення експериментальних досліджень сигналів АЕ в діапазоні 100–700 кГц, які виникають при механічній обробці металевих матеріалів.

3. Проведення частотного та амплітудного аналізу одержаних сигналів АЕ, визначення їх залежності від режимів різання та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу.

Розроблюваний експериментальний комплекс для вимірювання параметрів АЕ має забезпечувати:

- проведення реєстрації та аналізу сигналів акустичної емісії у діапазоні 100–700 кГц під час механічної обробки металевих заготовок;

- здійснення оперативного контролю процесу різання (виявлення перевантаження інструменту, ступінь розвитку деформаційних процесів при формуванні стружки), а також моніторинг стану металорізального інструменту, зокрема, зношення, викришування тощо.

Об'єктом контролю АЕ на перших етапах дослідження обрано прохідні токарні різці із твердосплавними пластинами, які встановлювалися у різцетримачі токарного верстату. Опорний датчик АЕ в залежності від виду обробки може бути встановлений як на інструменті так і безпосередньо на заготовці.

Експериментальний комплекс для вимірювання параметрів АЕ має містити наступні вузли.

1) П'єзоелектричний датчик АЕ із центральною частотою в межах 200–300 кГц і смугою пропускання 100–700 кГц. Критерії вибору датчика: висока чутливість (>50–55 дБ), доступність монтажних аксесуарів (тримаючі пружини, клейові адаптери), стійкість до дії мастильно-охолоджувальних рідин.

2) Підсилювач сигналів АЕ з коефіцієнтом підсилення від 40 до 60 дБ та із низьким рівнем шумів.

3) Високо швидкісний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) зі швидкістю дискретизації не менше ніж 2 МГц, що дозволить забезпечити достовірну оцифровку сигналів у діапазоні до 700 кГц з розрядністю 8-12–16 біт.

4) Високочастотний фільтр чи смуговий фільтр сигналів АЕ з діапазоном у межах 100–700 кГц.

5) Комп'ютерна система збору й обробки даних на основі DAQ-карти чи автономного реєстратора з використанням програмного забезпечення з функціями спектрального аналізу. Система повинна мати опції синхронізації з системою числового програмного керування металообробного обладнання для маркування даних про режим різання (v , s , t).

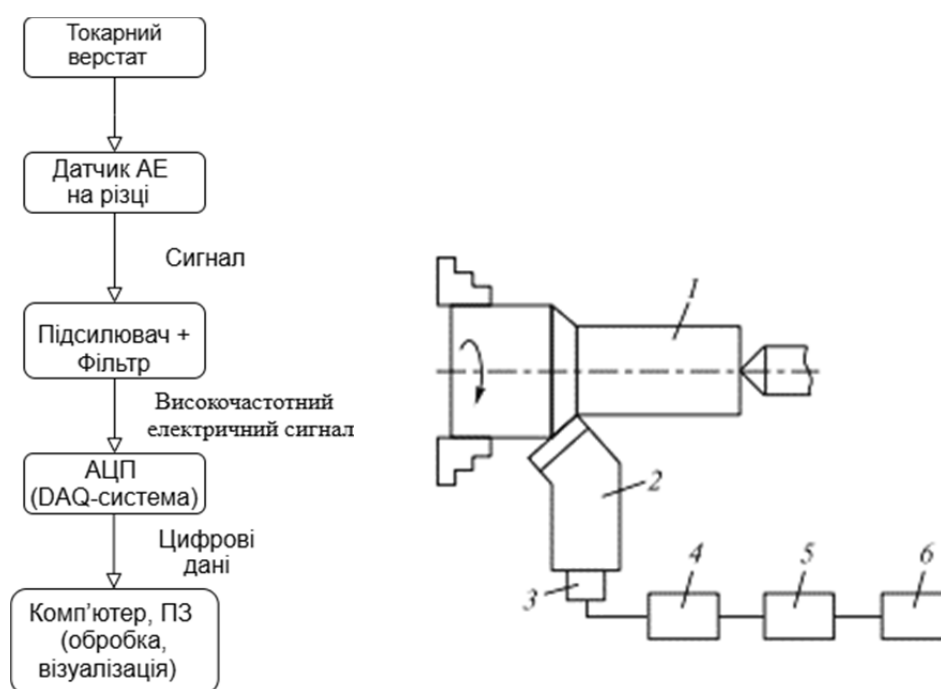


Рисунок 1 – Схема і блок-схема експериментальної установки для дослідження спектру акустичної емісії, що виникає у зоні різання металу:

1 – заготовка; 2 – різець; 3 – пьезоелектричний датчик; 4 – підсилювач; 5 – АЦП; 6 – комп'ютер

Джерело: розроблено авторами

На рис.1 наведено блок-схему вимірювального комплексу, що ілюструє послідовність обробки сигналу акустичної емісії під час токарної обробки металу. Вимірювальний комплекс забезпечує онлайн-моніторинг процесу різання та дозволяє ідентифікувати зміни в процесі різання та виявляти аномальні режими. Зона контакту різця із заготовкою на токарному верстаті є джерелом утворення акустичної емісії, яка у вигляді пружних хвиль через державку різця передається до датчика - п'єзоелектричного сенсора закріпленого безпосередньо на різці. Датчик АЕ сприймає високочастотні коливання і перетворює їх у відповідний електричний сигнал. Утворений слабкий високочастотний сигнал від датчика поступає електронний модуль, до складу якого входить підсилювач на 40–60 дБ та фільтр, який відсікає непотрібні частоти за допомогою вбудованих або зовнішніх фільтрів (HPF/LPF). В результаті такої

обробки формується вихідний аналоговий сигнал із відповідною амплітудою та чистотою для подальшого аналізу. Сигнал подається до DAQ-системи - аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який оцифровує посилений електричний сигнал. Перетворювач забезпечує високу частоту дискретизації до 1–2 МСемпл/с, щоб захоплювати імпульси АЕ у діапазоні 100–600 кГц, та передає отримані цифрові дані на комп'ютер, який здійснює аналіз сигналів (спектральний, часово-амплітудний), фільтрацію, збереження результатів і формування звітів. У якості комп'ютера застосовано ноутбук із програмним забезпеченням для обробки й візуалізації цифрових даних.

Експериментальна установка складається з таких основних компонентів.

1. Токарно - гвинторізний верстат 1И611П, з діапазоном швидкостей обертання шпинделя від 20 до 2000 об/хв та регульованою подачею.

2. Прохідний токарний різець з напаяною пластинкою з твердого сплаву Т15К6. На обробленому торці державки прохідного різця на відстані 100 мм від робочої кромки монтується датчик АЕ.

3. П'єзоелектричний датчик АЕ. Вибір датчика Vallen VS150-M здійснено на основі його робочої частоти 100 – 600 кГц, чутливості та розмірів. Для монтажу датчика використовували акустичний контактний гель Couplant D.



Рисунок 2 – П'єзоелектричний датчик АЕ

4. Підсилювач акустичних сигналів з вбудованою або зовнішньою системою фільтрації моделі PAC 2/4 Preamp (40–60 дБ).

5. DAQ-система обробки даних National Instruments NI USB-6361 (2 МСемпл/с), яка має достатню пропускну здатність USB або PCIe, щоб записувати дані у реальному часі без пропусків.



Рисунок 3 – Підсилювач акустичних сигналів PAC 2/4 Preamp

6. Комп'ютер з програмним забезпеченням для аналізу сигналів Matlab та спеціалізоване ПЗ для спектрального аналізу сигналів АЕ. Для проведення частотного аналізу сигналів АЕ застосовано перетворення Фур'є (FFT — Fast Fourier Transform). Така обробка здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (MATLAB з пакетом Signal Processing Toolbox, LabVIEW із Spectral Measurements Toolkit, або Python з бібліотеками NumPy/SciPy), що дозволяє виконувати швидко перетворення Фур'є та будувати спектр. Отримані спектри дають змогу виявити наявність «піків» у певних частотних діапазонах.

Перевірка роботи експериментального комплексу для вимірювання параметрів АЕ проводилася при повздовжньому обточуванні циліндричних заготовок діаметром 30 мм з вуглецевої сталі звичайної якості Ст.3сп (ДСТУ 2651-94). Прохідний токарний різець із встановленим на ньому датчиком АЕ закріплювався в чотирьохпозиційному різцетримачі токарного верстата. Перед початком різання проводився запуск програмного забезпечення для реєстрації сигналу АЕ з виставлянням необхідних параметрів (частота дискретизації, тривалість запису, фільтри заданого частотного діапазону). При проведенні точіння на обраних режимах різання, паралельно здійснювався безперервний запис сигналів АЕ. Зібрані дані піддавалися спектральному аналізу з проведенням швидкого перетворення Фур'є, аналізу амплітудно-часових параметрів, порівнянню результатів отриманих на різних режимах.

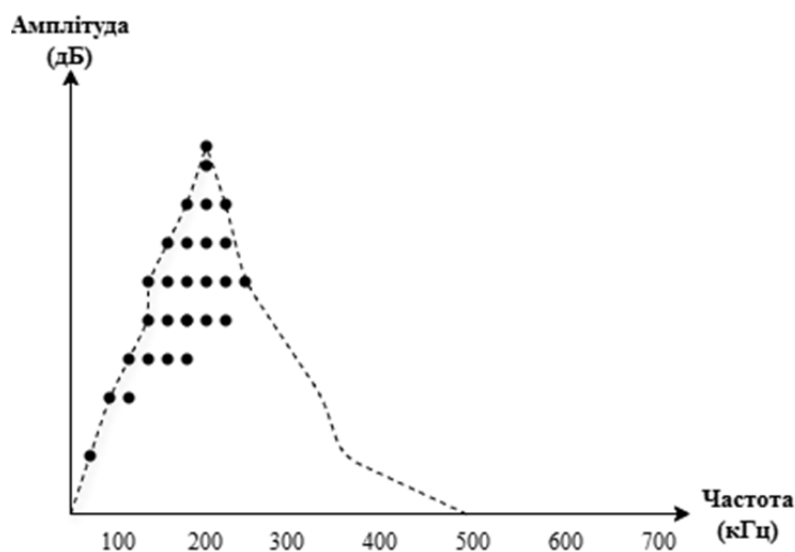


Рисунок 4 – Спектр сигналу АЕ

(значком «*» символічно позначено енергетичну щільність на різних частотах)

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 наведено оброблений спектр сигналу АЕ в логарифмічному масштабі по осі амплітуди.

Отримані результати вимірювання спектру сигналів АЕ за результатами оцифрування піддавали амплітудному аналізу, який дає можливість отримати часовий ряд та відстежувати зміни амплітуди з високою роздільністю. Амплітудний аналіз дозволяє оцінити «силу» сигналів АЕ. Амплітуду сигналів АЕ виражали у децибелах (дБ) відносно певного базового рівня або у вольтах (В) на виході

підсилювача. За результатами амплітудного аналізу сигналу АЕ встановлювалися наступні показники, які в подальшому використовувалися для аналізу процесів механічної обробки металевих матеріалів:

- пікова амплітуда (Peak Amplitude) — найбільше миттєве значення сигналу в часі;
- середньоквадратичне значення амплітуди (RMS) — кількісний вимір енергії сигналу в амплітудній шкалі;
- середня амплітуда (Average) — усереднене значення (корисно для оцінювання «типового» рівня АЕ в конкретному режимі різання).

Проведення амплітудного аналізу передбачає фільтрацію шумів, оскільки високочастотні коливання та паразитні завади можуть зростати і впливати на справжні піки сигналу АЕ. Для проведення фільтрації шумів застосовували порогову обробку, завдяки якій імпульси, амплітуда яких нижча певного рівня (наприклад, шумового фону), ігнорували як несуттєві. При цьому приймали за «фонову» інтенсивність АЕ середній фоновий рівень в межах 40–45 дБ. Процеси пластичної деформації металу заготовки в зоні різання, супроводжувалися епізодичними імпульсами АЕ з рівнем до 55–65 дБ. Сплески з рівнем понад 60 дБ (рис.5) можливо пояснити зривом наросту з передньої поверхні різця.

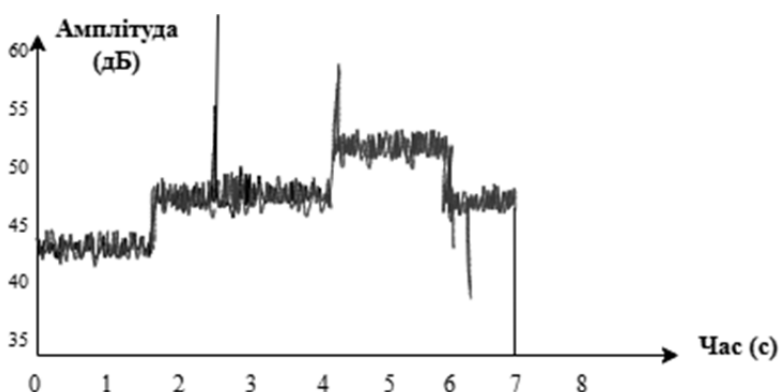


Рисунок 5 – Зміна амплітуда сигналу АЕ (дБ) при зміні глибини різання

Джерело: розроблено авторами

При зміні режимів різання (швидкість, глибина різання, подача) спостерігалось різке підвищення амплітуди сигналів. Як правило, критичні зони (наприклад, при виході інструмента на максимальне навантаження, або при початку «заглиблення» інструмента) супроводжуються різким зростанням амплітуди до 10–20 дБ вище середнього рівня.

В ході випробовування експериментальної установки підтверджено зміщення піків у вищу частотну ділянку при збільшенні швидкості різання. При зростанні швидкості різання формується тонша стружка з більшою швидкістю зсуву, що підсилює утворення дислокацій і мікророзривів, а отже збільшує інтенсивність АЕ. Збільшення глибини різання веде до зростання сили різання, що веде до зростання амплітуди сигналів АЕ. Підвищення повздовжньої подачі супроводжується вищими імпульсними значеннями (піковими амплітудами), зростанням кількості піків у діапазоні більш високих частот.

Особливості параметрів токарної обробки, наприклад, подача в зону різання мастильно-охолоджуючої рідини або зміна геометрії ріжучої частини різця створюють помітний вплив на параметри АЕ. Зокрема, при подачі мастильно-охолоджуючої рідини охолодження спостерігається зменшення загального рівня амплітуди АЕ, тоді як піки у спектрі стають чіткішими, що пов'язано зі зменшенням фонових шумів від тертя. При значному затупленні інструменту інтенсифікуються процеси тертя на ділянці зношеної ріжучої кромки різця, що веде до генерації додаткових шумів в діапазоні частот АЕ та імпульсів великої амплітуди.

Важливим практичним наслідком результатів дослідження є можливість створення системи онлайн-моніторингу, яка б автоматично визначала перевантаження інструмента або наявність критичних умов для різання (зростання температури, появу вібрацій, розвиток тріщин на ріжучій частині інструменту).

Висновки. Розроблено технічне завдання для створення експериментальної установки з реєстрації та аналізу сигналів акустичної емісії в діапазоні 100–700 кГц під час точіння металу. Отримано спектральні та амплітудні характеристики сигналів АЕ для різних режимів різання. Встановлено, що збільшення швидкості різання зміщує основні піки у вищу частотну область, а також призводить до зростання середньої амплітуди сигналів. Доведено вплив геометрії різця та зношення інструмента на структуру сигналів АЕ: при зношенні зростає амплітуда та збільшується кількість високочастотних імпульсів. Практична цінність полягає в можливості застосування акустичної емісії для моніторингу стану різального інструмента та прогнозування передчасного руйнування. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку системи автоматизованого аналізу АЕ-сигналів у реальному часі із застосуванням методів машинного навчання для класифікації режимів різання та стану інструмента.

Список літератури

1. Маковецький О. С. Механіка різання металів. К.: Наукова думка, 2015. 320 с.
2. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing Processes for Engineering Materials. 6th ed. Pearson, 2016.
3. Trent E. M., Wright P. K. Metal Cutting. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2000.
4. Hase A., Kitajima T., Ogawa T. Analysis of acoustic emission during orthogonal cutting of mild steel . *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. 214. P. 1758–1766.
5. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning . *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. 42. P. 157–165.
6. Шипунов Г. Д., Томашевський В. М., Кожевников В. А. Контроль і діагностика процесу різання методом акустичної емісії . *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2018. № 4. С. 67–72.
7. Pawar P. J., Joshi S. S. Analysis of acoustic emission signals and surface texture generated in turning process of metal matrix composites . *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. 210. P. 1641–1651.
8. Чорний М. В. Акустико-емісійні методи контролю в технічній діагностиці. Львів: Видавництво ЛП, 2019. 298 с.
9. Hashimoto F. Industrial Tool Wear . *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 2014.
10. Phadke A. M. Quality Engineering Using Robust Design. Prentice Hall, 1989.
11. Al-Ghamd A., Mba D. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size . *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. 20. P. 1537–1571.
12. Dornfeld D. A., Lee D. E. Precision Manufacturing. Springer, 2007.
13. Aggelis D. G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters . *Mechanics Research Communications*. 2011. 38(3). P. 153–157.
14. Holroyd T. J. Acoustic Emission & Ultrasonic Inspection in Condition Monitoring and Acoustic Emission. Coxmoor Publishing, 2002.

References

1. Makovetskyi, O. S. (2015). *Mechanics of Metal Cutting*. Kyiv: Naukova Dumka. 320 [in Ukrainian].
2. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2016). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. (6th ed.). Pearson.
3. Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal Cutting*. (4th ed.). Butterworth-Heinemann [in English].
4. Hase, A., Kitajima, T., & Ogawa, T. (2014). Analysis of acoustic emission during orthogonal cutting of mild steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1758–1766.
5. Li, X. (2002). A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 157–165.
6. Shipunov, G. D., Tomashevskyi, V. M., & Kozhevnykov, V. A. (2018). Control and Diagnosis of the Cutting Process by the Acoustic Emission Method. *Bulletin of NTU “KhPI”*, 4, 67–72 [in Ukrainian].
7. Pawar, P. J., & Joshi, S. S. (2010). Analysis of acoustic emission signals and surface texture generated in turning process of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, P. 1641–1651.
8. Chorny, M. V. (2019). *Acoustic Emission Methods for Control in Technical Diagnostics*. Lviv: LP Publishing [in Ukrainian].
9. Hashimoto, F. (2014). Industrial Tool Wear. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer.
10. Phadke, A. M. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall.
11. Al-Ghamd, A., & Mba, D. (2006). A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1537–1571.
12. Dornfeld, D. A., & Lee, D. E. (2007). *Precision Manufacturing*. Springer.
13. Aggelis, D. G. (2011). Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. *Mechanics Research Communications*, 38(3), 153–157.
14. Holroyd, T. J. (2002). *Acoustic Emission & Ultrasonic Inspection in Condition Monitoring and Acoustic Emission*. Coxmoor Publishing.

Dmytro Mitiev, Volodymyr Kropivnyi, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methodological Foundations for the Development of a Measurement System for Recording Acoustic Emission Signals during Machining

The study is aimed at investigating the correlation between AE signals and machining parameters—such as cutting speed, depth, feed rate, and tool condition—in order to optimize the process and predict tool wear. Reliable, real-time monitoring criteria were established to enhance production efficiency and ensure product quality.

To achieve these objectives, an experimental setup was designed and implemented, comprising a piezoelectric sensor (with a central frequency of 200–300 kHz and a passband of 100–700 kHz), an amplifier with a gain of 40–60 dB, and a high-speed analog-to-digital converter operating at a minimum sampling rate of 2 MHz. A computer-based data acquisition system was integrated into the measurement complex to perform both spectral and amplitude analyses of AE signals. Experimental tests were performed on cylindrical workpieces machined on a lathe under varying cutting conditions, with continuous AE signal registration and subsequent Fourier transform analysis. It was demonstrated that an increase in cutting speed shifts dominant frequency peaks to higher ranges and raises the overall amplitude of the AE signals. The experimental setup was also shown to be capable of detecting critical process conditions such as tool overload and early-stage tool wear, thereby laying the groundwork for automated quality control systems in metal machining.

In conclusion, a robust methodological framework for the use of AE signals in machining process monitoring has been established. The developed measurement complex proved effective in capturing and analyzing AE data in real-time, enabling the detection of anomalies and tool degradation. These findings underscore the potential of AE-based monitoring systems to enhance machining accuracy and prolong tool life. Future research is recommended to focus on the integration of machine learning techniques for improved signal classification and further automation of the monitoring process.

acoustic emission, metal machining, piezoelectric sensor, spectral analysis, amplitude analysis, tool wear monitoring

Одержано (Received) 22.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

О. В. Тимошенко, доц., канд. техн. наук, **О. С. Мусієнко**, д-р філос., **Я. В. Демешко**
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*
e-mail: timosaha@ukr.net, olga.musinko@gmail.com, demeshko.yaroslav.01@gmail.com

Технологічна пошкоджуваність конструкцій, виготовлених методом 3D-друку

У роботі досліджуються аспекти технологічної пошкоджуваності конструкцій, виготовлених за допомогою адитивних технологій, зокрема методом 3D-друку. Основною метою дослідження є аналіз впливу параметрів друку, зокрема ступеня заповнення, на механічні властивості матеріалу PLA, що є одним з найбільш популярних матеріалів для 3D-друку. У роботі детально розглянуто, як ступінь заповнення конструкцій, який варіюється від 20% до 100%, впливає на їх механічні характеристики, зокрема на межу міцності, модуль Юнга та деформацію при руйнуванні. Для дослідження було проведено експериментальні випробування на розтяг зразків PLA з різними відсотками заповнення. У результаті випробувань було виявлено, що з підвищенням ступеня заповнення конструкцій матеріал показує зростання жорсткості та міцності, однак на певних етапах цей ефект перестає бути лінійним. Найвищі значення механічних характеристик були зафіксовані при 100% заповненні, однак зменшення ступеня заповнення призводило до значного зниження міцності матеріалу, особливо при 20% заповненні, де було зафіксовано значну деформацію при менших навантаженнях. Це вказує на значний вплив внутрішньої структури матеріалу на його експлуатаційні характеристики, що повинно бути враховано при проєктуванні конструкцій для конкретних цілей.

PLA, 3D-друк, випробування на розтяг, міцність, модуль Юнга, початкова пошкоджуваність, параметр пошкоджуваності

Постановка проблеми. Сьогодні використання 3D-друку кардинально змінило напрям розвитку у багатьох галузях, зокрема машинобудуванні [1]. Його використовують для виготовлення деталей машин, протезів та несучих елементів конструкцій. Широкій популярності сприяла фундаментальна характеристика 3D-друку – виготовлення складних тривимірних об'єктів шляхом пошарового нанесення матеріалу, ця технологія суттєво скоротила час виготовлення деталей, зменшила витрату ресурсів та відкрила нові перспективи у машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найпоширенішою технологією 3D-друку є технологія моделювання плавненого осадження (FDM) [2 - 4]. Технологія полягає у екструзії, тобто пошарового нанесенні розплавленої нитки (філаменту) та її подальшому охолодженні, що і формує виріб шар за шаром.

Деталі виготовлення таким способом, через свою структуру, демонструють анізотропічні властивості [5, 6], що є актуальним питанням при визначенні міцності та несучої здатності елементів конструкції виготовлених методом FDM. Також міцність таких виробів залежить від вихідного матеріалу та схеми його укладання [7, 8], а також від параметрів друку. Для того щоб отримати виріб який буде повністю відповідати технічним вимогам, необхідно визначити найкращих параметри та налаштування для 3D – друку, такі натурні експерименти та чисельні моделювання проводяться різними групами дослідників [9, 10]. Однак, незважаючи на це, існує ще багато питань для подальших досліджень в цьому напрямку.

Поліактид (PLA) – термопласт, який виготовляється на основі молочної кислоти, отриманої з природних ресурсів. Він є одним із найпопулярніших матеріалів для 3D-Друку завдяки наступним перевагам: адаптивність, термопластичність, біосумісність та низька вартість [11].

Деформування конструкційних матеріалів, що відбувається за умов зовнішнього навантаження, супроводжується складними процесами зміни структури, зародженням, мікротріщин наступним руйнуванням елементу конструкції. Перша стадія руйнування (стадія розсіяного руйнування) складає 90 % життєвого циклу нової конструкції [12-15]. Вона описується, як правило, феноменологічними моделями у вигляді кінетичних рівнянь. В них пошкоджуваність матеріалу характеризується параметром пошкоджуваності, який може записати у вигляді скаляра, вектора або тензора [16-18]. Заклучна стадія руйнування (живучість) описана в літературі [19, 20] та моделях механіки руйнування [20-22].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є визначення механічних характеристик та параметру технологічної пошкоджуваності PLA при врахуванні ступеня заповнення.

Виклад основного матеріалу. Для визначення механічних характеристик було вирішено проводити випробування на розтяг. Для проведення експерименту було виготовлено зразки, згідно стандарту ДСТУ EN ISO 527-2:2018 [23] (Рис. 1). Зразки були надруковані на 3D-принтері. Налаштування друку: кількість стінок – 2 шт, товщина верхньої і нижньої кришки – 1мм, рисунок верхньої і нижньої кришки – монотонний, рисунок заповнення – лінія, діаметр сопла – 0.2 мм. Було надруковано зразки з різним відсотком заповнення: 20%, 40%, 60%, 80% та 100%.

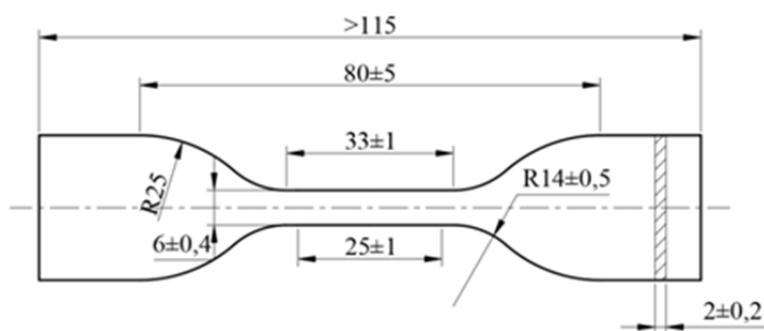


Рисунок 1 – Схема плоского зразка типу І відповідно до ДСТУ EN ISO 527-2:2018
Джерело: розроблено на підставі [23]

Після друку зразки було зважено, отримані дані занесено до таблиці 1.

Таблиця 1 – Вага зразка в залежності від ступеня заповнення

№ зразку	Заповнення, %	Вага, г	Густина
0	Філамент	0.6	1.2168
1	100	4.6	1.3945
2	80	4.3	1.3036
3	60	4.0	1.2126
4	40	3.7	1.1217
5	20	3.4	1.0308

Джерело: розроблено авторами

Експериментальні випробування проводились на універсальній розривній машині TIRAtest-2300. Сила вимірювалась за допомогою динамометра з ціною поділки 0,01 Н. Деформації вимірювалися з робочої частини зразка за допомогою тензOMETра з ціною поділки 0,001 мм [24]. Зовнішній вигляд зразків показаний на рисунку 2.

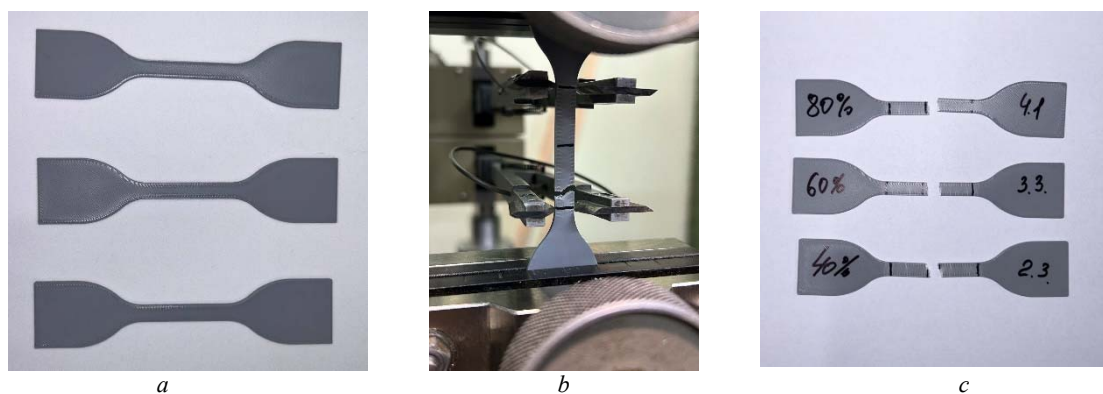


Рисунок 2 – Зразок після друку (а), у цангах (b) та після руйнування (с)

Джерело: розроблено авторами

Під час експерименту було випробувано 15 зразків. Для кожного відсотку заповнення було взято по 3 зразки. В результаті отримано діаграми розтягу для кожного ступеня заповнення зразку, що зображені на рисунку 3 [24].

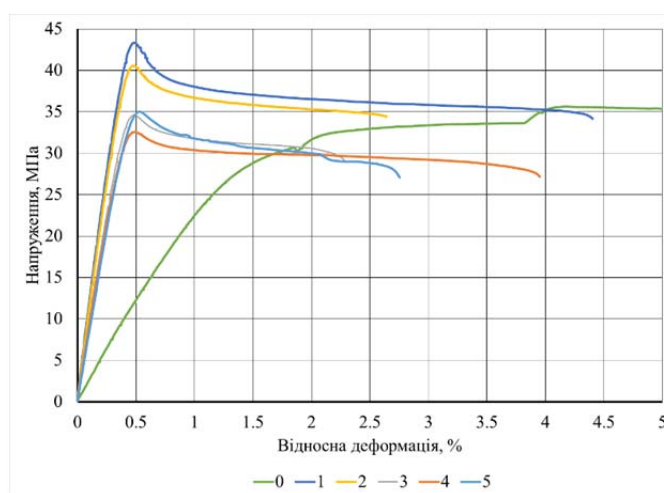


Рисунок 3 – Діаграми деформування: 0 – філамент, 1 – 100%, 2 – 80%, 3 – 60%, 4 – 40%, 5 – 20%

Джерело: розроблено авторами

Після обробки діаграм отримано значення границі міцності, відносної деформації та модуль Юнга для кожного ступеня заповнення. Отримані механічні характеристики наведено в таблиці 2.

Виходячи з отриманих результатів експериментальних досліджень, бачимо, що після термічного впливу спостерігається суттєве зменшення деформації з 23% до 4%, а модуль Юнга суттєво збільшується з 19 МПа до 112 МПа (рис. 4). Також з експериментальних даних видно вплив ступеня заповнення на поступове зменшення модуля Юнга, 112 МПа при 100% до 78 МПа при 20%, що показано на рис. 4.

Таблиця 2 – Механічні характеристики PLA

№ Зразку	Заповнення, %	Границя міцності, МПа	Відносна деформація при границі міцності, %	Модуль Юнга, МПа	Відносна деформація при руйнуванні
0	Філамент	40.79	3.13	19.19	22.88
1	100	43.47	0.59	112.19	3.01
2	80	39.72	0.49	104.52	3.81
3	60	34.59	0.47	89.90	3.03
4	40	32.56	0.47	85.69	3.21
5	20	34.65	0.47	78.12	3.91

Джерело: розроблено авторами

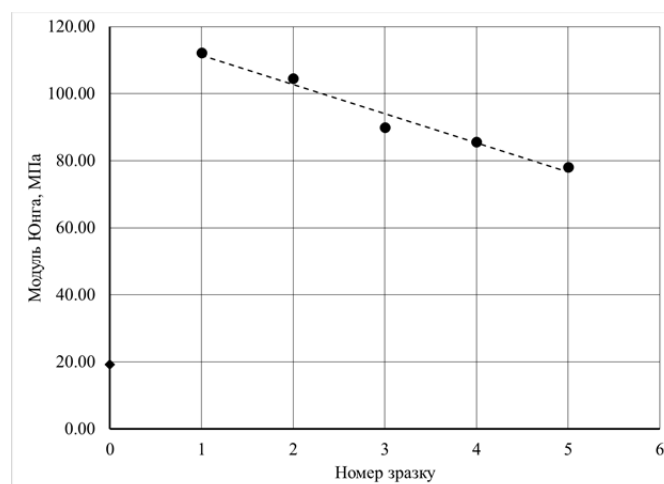


Рисунок 4 – Діаграма впливу ступеня заповнення на модуль Юнга

Джерело: розроблено авторами

Стадія розсіяного руйнування, що супроводжується деградацією модуля Юнга є основним показником впливу технологічної пошкоджуваності на міцність деталей та елементів конструкцій при різній ступені пошкодження [12-15]. За методом еквівалентних деформацій (МЕД) скалярний параметр пошкоджуваності D можна визначити згідно рівняння:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (1)$$

В свою чергу згідно методу еквівалентних енергій (МЕЕ), використовуючи основні положення термодинаміки незворотніх процесів, параметр прийме наступний вигляд:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E}} \quad (2)$$

Непошкодженим будемо вважати зразок з 100% заповнення. Тоді, згідно формул (1) та (2) розраховано параметр технологічної пошкоджуваності для PLA пластику. Результати розрахунку занесено до таблиці 3.

Таблиця 3 – Зміна параметрів пошкоджуваності від ступеня заповнення

№ зразку	Заповнення, %	D (МЕД)	D (МЕЕ)
1	100	0.000	0.000
2	80	0.068	0.035
3	60	0.199	0.105
4	40	0.236	0.126
5	20	0.304	0.166

Джерело: розроблено авторами

Виходячи з розрахунків, можна сказати, що параметр технологічної пошкоджуваності збільшується зі зменшенням ступеня заповнення (рисунок 5). Це свідчить про зменшення міцності та несучої здатності елемента конструкції, що буде виготовлений методом 3D-друку з PLA пластику.

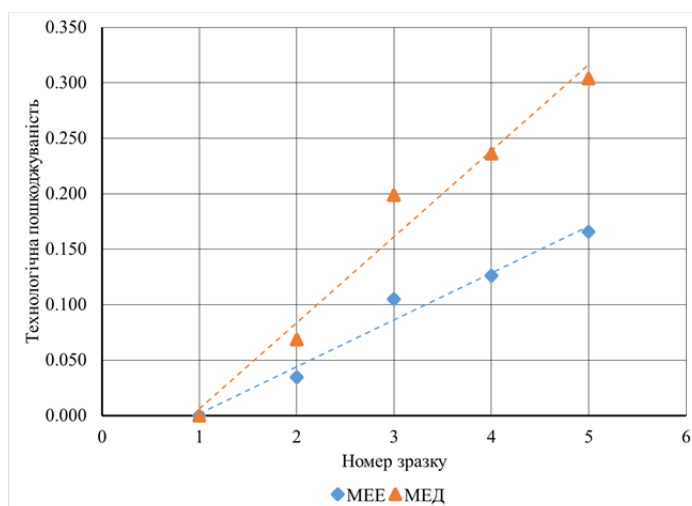


Рисунок 5 – Діаграма впливу ступеня заповнення на параметр технологічної пошкоджуваності
Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. За результатами проведених досліджень було виявлено, що параметри 3D-друку мають суттєвий вплив на механічні властивості виробів, виготовлених з PLA.

2. Виявлено, що ступінь заповнення конструкцій є одним з основних факторів, що визначає їх міцність. Встановлено, що при зміні заповнення від 100% до 20%, зміна границі міцності складає 21%, а модуля Юнга на 30%.

3. Урахування ступеня заповнення є важливим при проектуванні та виготовленні високонавантажених конструкцій за допомогою адитивних технологій. Визначення оптимальних параметрів друку на основі механічних властивостей матеріалу дозволить значно підвищити ефективність та надійність виробів, що відповідають сучасним вимогам в області адитивних технологій. Отримані результати дають змогу вибрати необхідний відсоток заповнення ще на етапі проектування, виходячи з технічних вимог до конструкції.

Список літератури

1. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., Koppad, P. G. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 2612–2641.
2. Залохін, М. Ю., Склярів, В. В., Довженко, Ю. С., Брега, Д. А. Експериментальне визначення та порівняльний аналіз міцнісних характеристик полімерів PPH030GP, ABS і PLA при різних швидкостях деформування. *Science & Technique*. 2019. №18. С. 233–239.
3. Stoia, D. I., Marsavina, L., Linul, E. Mode I critical energy release rate of additively manufactured polyamide samples. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 114. Article 102968.
4. Singamneni, S., Behera, M. P., Truong, D., Le Guen, M. J., Macrae, E., Pickering, K. Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 936–949.
5. Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D., Li, P. A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 4860–4879.
6. Vidakis, N., Kechagias, J. D., Petousis, M., Vakouftsi, F., Mountakis, N. The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption. *Materials and Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 915–932.
7. Cai, L., Byrd, P., Zhang, H., Schlarman, K., Zhang, Y., Golub, M., Zhang, J. Effect of printing orientation on strength of 3D printed ABS plastics. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. P. 453–460.
8. Мусієнко, О. С., Слободянюк, І. В., Ремінний, В. А. Вплив вологості полімерних матеріалів на механічні характеристики виробів, надрукованих методом 3D-друку. *Організаційно-економічні методи реалізації інноваційної моделі розвитку економіки*. 2024. С. 148.
9. Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., et al. The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 1134–1139.
10. Rubashevskiy, V., Shukayev, S. Міцність і пружність PLA+ графіт композитів: експериментальний і теоретичний аналіз // *Mechanics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 7, No. 2 (98). С. 145–154.

11. Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., Abbas, N. A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications. *Journal of Polymer Research*. 2022. Vol. 29. Article 123.
12. Lemaitre, J., Desmorat, R. *Engineering Damage Mechanics*. Paris: Springer, 2005. 380 p.
13. Badreddine, H., Saanouni, K., Nguyen, T. D. Damage anisotropy and its effect on the plastic anisotropy evolution under finite strains. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 63. P. 11–31.
14. Lu, D., et al. Double scalar variables plastic-damage model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 2022. Vol. 148, No. 2. Article 04021143.
15. Xing, L., et al. A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*. 2022. Vol. 157. Article 103390.
16. Chaouov, M. G., Maruschak, P. O., Hutsaylyuk, V., Śniezek, L., Pylypenko, A. P. Effect of complex combined loading mode on the fracture toughness of titanium alloys. *Vacuum*. 2018. Vol. 147. P. 51–57.
17. Betten, J. Damage tensors in continuum mechanics. *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*. 1983. No. 1. P. 13–32.
18. Shedbale, A. S., Sun, G., Poh, L. H. A localizing gradient enhanced isotropic damage model with Ottosen equivalent strain for the mixed-mode fracture of concrete. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 199. Article 106410.
19. Brünig, M., Koirala, S., Gerke, S. Micro-mechanical numerical analysis on ductile damage in multiaxially loaded anisotropic metals. *Computational Mechanics*. 2024. Vol. 73, No. 2. P. 223–232.
20. Keshavarz, A., Ghajar, R. Effect of isotropic and anisotropic damage and plasticity on ductile crack initiation. *International Journal of Damage Mechanics*. 2019. Vol. 28, No. 6. P. 918–942.
21. Xing L., et al. A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*. 2022. Vol. 157. P. 103390.
22. Yue, Z., et al. Failure prediction on steel sheet under different loading paths based on fully coupled ductile damage model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 153. P. 1–9.
23. ДСТУ EN ISO 527-3:2017. Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 3. Умови випробування для плівок і листів (EN ISO 527-3:1995; AC:2002, IDT; ISO 527-3:1995; Cor.1:2001, IDT).
24. Тимошенко, О. В., Мусяченко, О. С., Демешко, Я. В. Вплив структури заповнення на міцність PLA-пластику при 3D-друці. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. 2024. С. 60–62.

References

1. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., & Koppad, P. G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612–2641. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.022>.
2. Zalohin, M. Yu., Skliarov, V. V., Dovzhenko, J. S., & Brega, D. A. (2019). Experimental determination and comparative analysis of the PPH030GP, ABS and PLA polymer strength characteristics at different strain rates. *Science & Technique*, 18, 233–239. DOI:10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239.
3. Stoia, D. I., Marsavina, L., & Linul, E. (2021). Mode I critical energy release rate of additively manufactured polyamide samples. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114, 102968. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102968> [in English].
4. Singamneni, S., Behera, M. P., Truong, D., Le Guen, M. J., Macrae, E., & Pickering, K. (2021). Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 936–949. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.041>.
5. Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D., & Li, P. (2021). A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4860–4879. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.071>.
6. Vidakis, N., Kechagias, J. D., Petousis, M., Vakouftsi, F., & Mountakis, N. (2023). The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption. *Materials and Manufacturing Processes*, 38(8), 915–932. <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2191842>.
7. Cai, L., Byrd, P., Zhang, H., Schlarman, K., Zhang, Y., Golub, M., & Zhang, J. (n.d.). Effect of printing orientation on strength of 3D printed ABS plastics.
8. Musiienko, O. S., Slobodianiuk, I. V., & Reminny, V. A. (2024). The influence of moisture content of polymeric materials on the mechanical characteristics of products printed by 3D printing. *Sekcia 1 "Organisacyjno-ekonomichni Metodi realizacii inovacyjnoi modeli rozvutky ekonomiky"*, p.148 [in Ukrainian].
9. Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., & others. (2020). The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1134–1139. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.134>.
10. Rubashevsky, V. V., & Shykaev, S. M. (2020). Micnist i pruzhnist PLA + graphit compositivy: experimentalny I teoretichnyy analiz. [Strength and elasticity of PLA + graphite composites: experimental and theoretical analysis.] p.145-154 [in Ukrainian].
11. Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., & Abbas, N. (n.d.). A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications.
12. Lemaitre, J., & Desmorat, R. (2005). *Engineering Damage Mechanics*. Springer.

13. Badreddine, H., Saanouni, K., & Nguyen, T. D. (2015). Damage anisotropy and its effect on the plastic anisotropy evolution under finite strains. *International Journal of Solids and Structures*, 63, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.02.009>.
14. Lu, D., et al. (2022). Double scalar variables plastic-damage model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 148(2), 04021143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002049) [in English].
15. Xing, L., et al. (2022). A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*, 157, 103390. doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103390.
16. Chausov, M. G., Maruschak, P. O., Hutsaylyuk, V., Śnieżek, L., & Pylypenko, A. P. (2018). Effect of complex combined loading mode on the fracture toughness of titanium alloys. *Vacuum*, 147, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.10.010> [in English].
17. Betten, J. (1983). Damage tensors in continuum mechanics. *Journal de mécanique théorique appliquée*, 1, 13–32.
18. Shedbale, A. S., Sun, G., & Poh, L. H. (2021). A localizing gradient enhanced isotropic damage model with Ottosen equivalent strain for the mixed-mode fracture of concrete. *International Journal of Mechanical Sciences*, 199, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106410> [in English].
19. Brünig, M., Koirala, S., & Gerke, S. (2024). Micro-mechanical numerical analysis on ductile damage in multiaxially loaded anisotropic metals. *Computational Mechanics*, 73(2), 223–232. <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02258-7>.
20. Keshavarz, A., & Ghajar, R. (2019). Effect of isotropic and anisotropic damage and plasticity on ductile crack initiation. *International Journal of Damage Mechanics*, 28(6), 918–942. <https://doi.org/10.1177/1056789519829691>.
21. Xing, L., et al. (2022). A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*, 157, 103390. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103390>.
22. Yue, Z., et al. (2019). Failure prediction on steel sheet under different loading paths based on fully coupled ductile damage model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105349>.
23. DSTU EN ISO 527-3:2017. (2017). Plasmasy. Vysnachennya vlastivostey pid chas roztyguvannya. Chastyna 3. Umovy vyprobyvannya dlya plivok ta listiv. [Plastics. Determination of tensile properties. Part 3. Test conditions for films and sheets.] [in Ukrainian].
24. Tymoshenko, O. V., Musiienko, O. S., & Demeshko, Y. V. (2023). Vplyv struktury zapovneniya na micnist PLA-plastyku pry 3D-druci [Influence of the filling structure on the strength of PLA plastic in 3D printing.] p.60-62 [in Ukrainian].

Oleksandr Tymoshenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olha Musiienko**, PhD tech. sci., **Yaroslav Demeshko**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Technological Damage to Structures Made by 3D Printing

This paper investigates aspects of technological damage to structures made using additive technologies, in particular, 3D printing. The main objective of the study is to analyze the effect of printing parameters, in particular the degree of filling, on the mechanical properties of PLA material, which is one of the most popular materials for 3D printing. The paper discusses in detail how the degree of filling of structures, which varies from 20% to 100%, affects their mechanical characteristics, in particular, tensile strength, Young's modulus, and fracture strain.

To investigate this, experimental tensile tests were conducted on PLA samples with different percentages of filling. The tests revealed that with an increase in the degree of filling of the structures, the material shows an increase in stiffness and strength, but at certain stages this effect ceases to be linear. The highest values of mechanical characteristics were recorded at 100% filling, but a decrease in the degree of filling led to a significant decrease in the strength of the material, especially at 20% filling, where significant deformation was recorded at lower loads. This indicates a significant influence of the internal structure of the material on its performance, which should be taken into account when designing structures for specific purposes.

The obtained results allow us to draw important conclusions regarding the optimization of 3D printing parameters for the manufacture of PLA structures, taking into account the requirements for mechanical properties. Evaluation of the effect of the degree of filling on the parameters of technological damage to the material allows us to develop recommendations for selecting optimal printing conditions depending on the type of product and its intended operating conditions. As a result of the study, the correlation between the mechanical properties of the material and the parameters of 3D printing was determined, which is key to the development of efficient and reliable structures in various fields of application of additive technologies.

PLA, 3D printing, tensile testing, strength, Young's modulus, initial damage, damage parameter

Одержано (Received) 07.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 622.7.09:621.039.84

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.108-114](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.108-114)А. А. Азарян¹, проф., д-р техн. наук, Д. В. Швець¹, доц., канд. техн. наук,А. А. Трачук¹, доц., канд. техн. наук, О. В. Швидкий²¹Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна²ТзОВ «Рудпромгеофізика», м. Кривий Ріг, Україна

e-mail: dmitriy.shvets@knu.edu.ua

Оперативний контроль вмісту заліза в пульпі зливу класифікатора з використанням гамма-випромінювання

Проведено дослідження можливості оперативного контролю вмісту заліза в гетерофазних середовищах з використанням гамма-абсорбційного методу. Розглянуто пристрій для оперативного визначення вмісту заліза в залізорудній пульпі в умовах рудозбагачувальної фабрики та досліджено вплив збурюючих факторів на точність контролю. Підготовлено набори зразків із вмістом заліза, характерним для концентрату, вихідної руди та хвостів збагачення. Проведено експериментальні дослідження впливу густини залізорудної пульпи і вмісту твердого в ній на інтенсивність зареєстрованого гамма-випромінювання при використанні гамма-абсорбційного методу контролю. Проведені експерименти підтвердили перспективність використання гамма-абсорбційного методу для визначення вмісту заліза в руді в разі сталості густини пульпи або при введенні поправки на фактичне значення густини.

ядерно-фізичні методи, гамма-випромінювання, контроль якості, пульпа

Постановка проблеми. Україна стабільно входить до першої десятки країн найбільших виробників сталі, і саме виробництво металу та видобуток руди є сьогодні головними галузями її спеціалізації в міжнародному розподілі праці. Згідно з [1], чорна металургія забезпечує до 40% усього експорту країни, виступаючи при цьому основною експортною галуззю. Цьому сприяє істотний обсяг запасів залізних руд в Україні, що розробляються як відкритим, так і підземним способом.

Сьогодні на особливу увагу заслуговує впровадження нових передових технологій з прямого відновлення заліза (Itmk3 [2], Midrex [3]). Опанування виробництва таких високотехнологічних видів підготовленої металургійної сировини, як металізовані брикети із вмістом заліза до 72 %, окатиші із вмістом заліза до 68 % і вмістом кремнезему менше 1,5 %, створять передумови для переходу на бездоменне виробництво сталі, а в подальшому – і прокату, безпосередньо на гірничо-збагачувальних комбінатах.

Водночас, якість залізорудного концентрату є критично важливою як для конкурентоспроможності вітчизняної сировини на світовому ринку, так і для її ефективної металургійної переробки. Одним із ключових показників технологічного процесу підготовки руди до збагачення є стабільність вмісту заліза в промпродукті. Другим суттєвим фактором є густина пульпи на зливі класифікуючого апарату, яка значною мірою визначає ефективність процесу збагачення та обсяг втрат корисного компонента у хвості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для контролю вмісту корисного компонента в залізорудній сировині традиційно застосовуються хімічні методи. Вони демонструють високу точність, проте не забезпечують достатньої оперативності - час отримання результатів хімічного аналізу становить близько двох годин [4]. У

виробничих умовах це дає змогу лише оцінювати відповідність технологічних параметрів процесу заданим показникам для вже переробленої залізорудної сировини. Тому виникає необхідність у застосуванні методів оперативного контролю для врахування стохастичності властивостей руди, що подається на першу стадію подрібнення і класифікації. Отримана при цьому інформація дасть змогу своєчасно здійснювати керуючі впливи на процес переробки руди для досягнення необхідних показників збагачення.

Серед методів, що дають змогу проводити оперативний аналіз, можна виділити магнітометричні [5], ультразвукові [6] і ядерно-фізичні [7]. Перші з зазначених засновані на вимірюванні зміни відносної магнітної проникності [8] під час взаємодії з досліджуваною пробою. Таким чином, магнітометричні методи не дають змоги отримувати дані про вміст загального заліза, тобто про сумарний вміст корисних мінералів, обмежуючись тільки тими, що виявляють магнітні властивості. Ультразвукові методи базуються на вимірюванні параметрів ультразвукових об'ємних і поверхневих хвиль, а також їхньому поширенні в рідких і твердих середовищах [9]. Вони можуть застосовуватися для контролю вмісту заліза в пульпі, що є гетерофазним середовищем, проте точність цього методу може погіршуватися через утворення бульбашок газу в зоні аналізу. Також істотний вплив на результати вимірювань чинить коливання в'язкості пульпи, що зумовлено зміною параметрів акустичного поглинання та розсіювання ультразвуку.

Ядерно-фізичні методи контролю позбавлені зазначених недоліків і дають змогу визначати вміст корисного компонента завдяки підрахунку зареєстрованих ядерних частинок, що взаємодіють із досліджуваним середовищем [10]. Як правило, цей клас методів застосовується для контролю параметрів у твердих зразках. Крім того, вони можуть успішно застосовуватися для контролю густини суспензій [11]. До ядерно-фізичних входить ціла низка методів, включно з урахуванням комптонівського розсіювання [12], використанням нейтронного активаційного аналізу [13], методом Мессбауерівської спектроскопії [14]. Одним із підходів, що дає змогу виконати аналіз властивостей гетерофазних середовищ, є гамма-абсорбційний метод.

Таким чином, об'єктом дослідження в цій роботі є процес контролю вмісту заліза в пульпі зливу класифікатора рудозбагачувальної фабрики. Предметом дослідження, своєю чергою, є засоби контролю параметрів технологічних процесів гірничого виробництва на базі використання ядерно-фізичних методів.

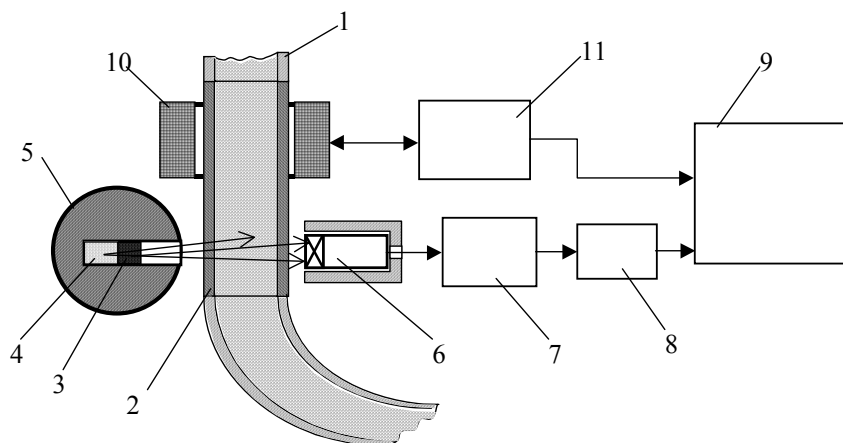
Постановка завдання. Метою роботи є дослідження можливості оперативного контролю масової частки заліза в гетерофазних середовищах з використанням гамма-абсорбційного методу. Методами дослідження є статистичний аналіз, а також лабораторні дослідження факторів, що впливають на точність застосування гамма-абсорбційного методу для визначення вмісту корисного компонента в залізорудній пульпі.

Викладення основного матеріалу. Під час роботи було проведено підготовку представницьких проб для дослідження процесів поглинання гамма-випромінювання в гетерофазних середовищах.

Проби в кількості 90 шт. було відібрано на ПівнГЗК з масовою часткою заліза 14.65, 34.75 та 65.13 відсотків відповідно. При цьому проби з масовою часткою 14.65% були класифіковані як «хвости», 34.75% - як промпродукт, а 65.13% - як концентрат.

Контроль густини пульпи та масової частки корисного компонента у твердій фазі пульпи безпосередньо в технологічному ланцюзі пропонується здійснювати з використанням пристрою, що наведений на рисунку 1. Пристрій працює наступним чином. Пульпа подається в зону контролю трубопроводом 1, який має вставку 2 з полімерного зносостійкого матеріалу (наприклад, супралену). На пульпу спрямовано потік випромінювання низькоенергетичного і високоенергетичного джерел квантів 3 і 4

відповідно, розміщених у свинцевому контейнері-коліматорі 5, що забезпечує біологічний захист і формує вузький пучок гамма-квантів у напрямку пульпопроводу. Гамма-кванти, що пройшли крізь стінки пульпопроводу і шар пульпи, потрапляють на кристал сцинтиляційного датчика 6. Інтенсивність квантів, що потрапили на кристал датчика 6, перетворюється ним у частоту електричних імпульсів різної амплітуди, пропорційних енергії зареєстрованих квантів. Імпульси з датчика 6 надходять на вхід амплітудного аналізатора 7, де відбувається їх поділ за амплітудами і виокремлення частоти імпульсів I_1 , яка відповідає квантам низькоенергетичного джерела (60 кеВ) випромінювання (Am-241), та частоти імпульсів I_2 , що відповідає квантам високоенергетичного (660 кеВ) джерела (Cs-137). Згідно з теорією взаємодії гамма-квантів різних енергій з речовиною, інтенсивність I_2 високоенергетичних квантів, що пройшли через речовину, несе інформацію про густину речовини, низькоенергетичних I_1 - про еквівалентний атомний номер речовини (що характеризує вміст заліза загального). З амплітудного аналізатора 7 через узгоджувальний каскад 8 сигнал, пропорційний відношенню інтенсивностей I_1/I_2 , подається на вхід ПЕОМ 10, де, за спеціально розробленою програмою, відбувається обчислення густини пульпи та вмісту заліза загального в ній.



1 - пульпопровід; 2 - вставка з немагнітного матеріалу; 3 - джерело низькоенергетичних гамма-квантів Am-241, 60 кеВ; 4 - джерело високоенергетичних гамма-квантів Cs-137, 660 кеВ; 5 - захисний контейнер; 6 - сцинтиляційний датчик; 7 - аналізатор імпульсів; 8 - узгоджувальний каскад; 9 - ПЕОМ; 10 - котушка індуктивності; 11 - генератор

Рисунок 1 – Блок-схема пристрою визначення вмісту заліза в пульпопроводі

Джерело: розроблено авторами

Вміст магнітної фракції заліза визначається за величиною магнітної провідності пульпи за допомогою датчика індуктивності 10, генератора частоти 11, з'єднаного з датчиком 10. Індуктивність датчика 10 пов'язана з магнітною провідністю пульпи, яка залежить від вмісту магнітної складової заліза в пульпі. Своєю чергою, частота генератора 11 пов'язана з індуктивністю датчика і, як наслідок, з магнітною провідністю пульпи. Таким чином, з генератора 10 на інший вхід ПЕОМ надходить сигнал про магнітну провідність пульпи, за величиною якого можна судити про вміст у пульпі заліза магнітного, але за умови сталості густини пульпи. Але оскільки ця умова не завжди витримується, то під час обчислення ПК вмісту в програмі враховується фактична на даний момент часу густина пульпи, визначена за допомогою гамма-датчика.

Пульпа готувалася з проб хвостів, рядової руди та концентрату шляхом порційного додавання по 20 г твердого до 200 мл води і подальшого їх перемішування. Після кожного додавання і перемішування проводилось 3-х кратне вимірювання

інтенсивності пройшовшого крізь пробу випромінювання при циклі однієї експозиції 60с. Початковий шар води в кюветі становив 50 мм. Після додавання твердого кінцевий об'єм пульпи становив 250 мл для «хвостів» і 235 мл для концентрату. Відповідно шар пульпи в кюветі становив 62 і 59 мм. Спочатку об'єм води становив 200 см^3 , після додавання 140 г твердого об'єм V пульпи і її густина ρ склали відповідно для:

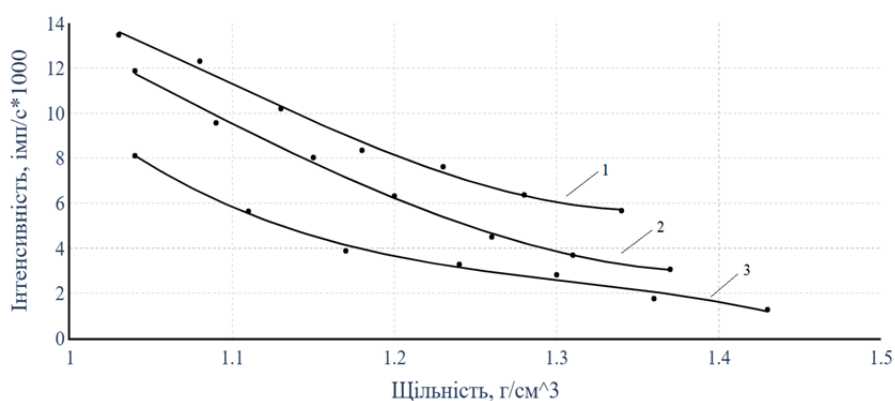
хвостів – $V = 250 \text{ см}^3$, $\rho = 1.36 \text{ г/см}^3$;

руди – $V = 245 \text{ см}^3$, $\rho = 1.39 \text{ г/см}^3$;

концентрату – $V = 235 \text{ см}^3$, $\rho = 1.45 \text{ г/см}^3$.

Таким чином, у процесі експериментів вміст твердого в пульпі змінювався від 0 до 41.2 % із проміжними значеннями 9 %; 16.6 %; 23 %; 28.6 %; 33.3 %; 37.5 %; 41.2 %. Щільність пульпи ρ також змінювалася відповідно.

На рисунку 2 наведено залежності інтенсивності випромінювання, що пройшло скрізь пробу, від вмісту твердого в пульпі за вмісту заліза загального 14.25%, 34.72%, 65.13%.



1 – Fe = 14.25%; 2 – Fe = 34.72%; 3 – Fe = 65.13%

Рисунок 2 - Залежність інтенсивності випромінювання від густини в пульпі за різного вмісту заліза загального

Джерело: розроблено авторами

У результаті досліджень, наведених на рисунку 2, отримано такі аналітичні рівняння та надійність апроксимації для:

хвостів:

$$y = 0.0197x^3 - 0.1308x^2 - 1.3913x + 15.116$$

$$R^2 = 0.993$$

руди:

$$y = 0.0164x^3 - 0.0558x^2 - 1.9458x + 13.786$$

$$R^2 = 0.998$$

концентрату:

$$y = -0.0528x^3 + 0.7962x^2 - 4.5146x + 11.869$$

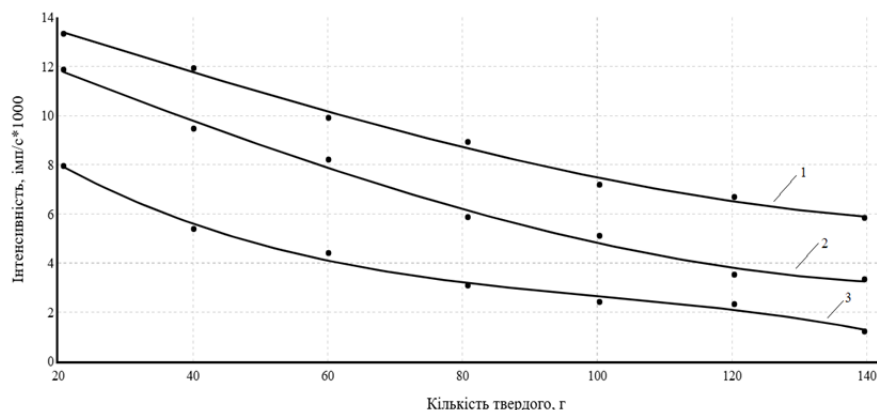
$$R^2 = 0.995$$

Для дослідження енергетичних спектрів проникаючого і розсіяного гамма-випромінювання різних джерел іонізуючого випромінювання на межах гетерофазних середовищ було розроблено датчик гамма-випромінювання.

В ході роботи було досліджено функцію

$$N = f(k, \rho, q)$$

де N - інтенсивність інтегрального потоку гамма-випромінювання, що пройшло крізь досліджуване середовище; k - кількість твердого; ρ - густина пульпи; q - масова частка корисного компонента гетерофазного середовища.



1 – Fe = 14.25%; 2 – Fe = 34.72%; 3 – Fe = 65.13%

Рисунок 3 - Залежність інтенсивності гамма-випромінювання від кількості твердого в пульпі

Джерело: розроблено авторами

Отримано наступні аналітичні рівняння та надійність апроксимації залежності інтенсивності гамма-випромінювання від кількості твердого в пульпі для:

хвостів:

$$y = 0.0131x^3 - 0.0515x^2 - 1.5796x + 15.004$$

$$R^2 = 0.994$$

руди:

$$y = 0.0142x^3 - 0.0199x^2 - 2.069x + 13.859$$

$$R^2 = 0.992$$

концентрату:

$$y = -0.0467x^3 + 0.7148x^2 - 4.1621x + 11.41$$

$$R^2 = 0.992$$

Аналіз отриманих результатів показав, що зміна твердого на 1% еквівалентна зміні вмісту заліза в твердому на 2.5...3.7% (залежно від діапазону вмісту). При цьому лінійний коефіцієнт поглинання випромінювання водою становив $0,146 \text{ см}^{-1}$.

За фіксованих значень вмісту твердого, залежність інтенсивності випромінювання, що пройшло крізь пробу, від вмісту заліза в діапазоні зміни вмісту від 14 до 65%, можна виразити наступним чином

$$N = N_0 e^{-0.0196q} \text{ – при вмісті твердого } 33.3\%$$

або

$$N = N_0 e^{-0.0246q} \text{ – при вмісті твердого } 37.5\%$$

де q - вміст заліза в твердому, %.

Порівнюючи вплив на інтенсивність випромінювання зміни вмісту твердого та вмісту заліза, можна зазначити, що зміна вмісту твердого (густина) на 1% призводить до більшої зміни інтенсивності, ніж зміна на 1% вмісту заліза.

Висновки. У результаті проведених досліджень отримано наступні результати.

1. Усереднені значення чутливості до зміни вмісту заліза при вмісті твердого 33.3% становлять 2.49% інтенсивності на 1% заліза. За вмісту твердого 37.5% це значення дорівнює 2.58% на 1%.

2. У діапазоні вмісту заліза 37 - 65% зазначені показники становлять 1.5% і 2.2% інтенсивності на 1% заліза.

3. Чутливість до зміни густини при фіксованому значенні вмісту заліза в твердому становить 4.4% інтенсивності на 1% зміни густини при вмісті 14.25% заліза в твердому. При вмісті заліза 34.72% зазначена чутливість становитиме 4.7%, а при вмісті 65% - 10.4%.

4. Максимальна чутливість до визначення заліза спостерігається при низьких вмістах заліза, при цьому спостерігається менший вплив густини (1% зміни густини \approx 1.5...2% зміни вмісту заліза).

Проведені експерименти підтвердили перспективність використання гамма-абсорбційного методу визначення вмісту заліза загального тільки в разі або сталості густини пульпи, або при введенні поправки на фактичне значення густини.

Список літератури

1. Кондратець В. О., Сербул О. М., Мацуї А. М. Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами. Кіровоград: КОД, 2013. 368 с.
2. Elsayed E. A. Overview of ITMK3 process. *International Journal of Industrial Engineering Research and Development*. 2017. Т. 8, № 2. DOI: 10.34218/ijierd.8.2.2017.001.
3. Jiang X., Wang L., Shen F. M. Shaft Furnace Direct Reduction Technology - Midrex and Energiron. *Advanced Materials Research*. 2013. Т. 805-806. С. 654–659.
4. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 5, № 95. С. 13–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003.
5. Дрига В. В., Швидкий О. В., Карачабан А. С. Контроль якості залізорудної сировини в порошкових пробах за допомогою пристрою ДЖМЗ-М1. *Якість мінеральної сировини*. Кривий Ріг, 2011. С. 180-184.
6. Influence of the Magnetic Field on Love Waves Propagation in the Solid Medium / O. Porkuian та ін. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 22–24 April 2020. 2020. DOI: 10.1109/elnano50318.2020.9088802.
7. Пристрій для оперативного контролю масової частки заліза магнітного у гірській масі: патент 80694 / Азарян А.А., Дрига В.В., Цибулевський Ю.Є.; власник патенту ТОВ «Рудпромгеофізика»
8. Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2017. №. 3. С. 175–182. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-19.
9. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Т. 3, № 5 (99). С. 29–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
10. A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution / R. Qin та ін. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. С. 112-202. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112202.
11. Determining the density of liquid using gamma scattering method / H. D. Chuong та ін. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Т. 163. С. 109-197. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109197.
12. Deep learning based Compton backscatter imaging with scattered X-ray spectrum data: A Monte Carlo study / C. Shi та ін. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. С. 112–148. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112148.
13. Online analysis of iron ore slurry using PGNAА technology with artificial neural network / H. Huang та ін. *Nuclear Engineering and Technology*. 2024. DOI: 10.1016/j.net.2024.02.046.
14. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / M. Manjunatha та ін. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Т. 8, № 2. С. 2192–2200. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.022.

References

1. Kondratets, V. O., Serbul, O. M., & Matsui, A. M. (2013). *Avtomatyzatsiia protsesiv keruvannia rozridzhenniam pulpy pry podribnenni rudy barabannymy mlynamy [Automation of Pulp Dilution Control Processes in Ore Grinding with Drum Mills]*. Kirovohrad: KOD [in Ukrainian].
2. Elsayed, E. A. (2017). Overview of ITMK3 process. *International Journal of Industrial Engineering Research and Development*, 8(2). doi:10.34218/ijierd.8.2.2017.001.
3. Jiang, X., Wang, L., & Shen, F. M. (2013). Shaft Furnace Direct Reduction Technology - Midrex and Energiron. *Advanced Materials Research*, 805-806, 654–659.
4. Azaryan, A. (2018). Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at

- open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(95), 13–19. doi:10.15587/1729-4061.2018.144003.
5. Dryha, V. V., Shvydkyi, O. V., & Karachaban, A. S. (2011) Quality Control of Iron Ore Raw Materials in Powder Samples Using the DZM3-M1 Device. *Yakist mineralnoi syrovyny*. Kryvyi Rih, 180-184. [in Ukrainian].
 6. Porkuian, O. (2020). Influence of the Magnetic Field on Love Waves Propagation in the Solid Medium. In *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. doi:10.1109/elnano50318.2020.9088802.
 7. Azarian, A. A., Dryha, V. V., & Tsybulevskiy, Yu. Yu. (2007). *Ukrainian Patent No. 80694*.
 8. Morkun, V. S., Morkun, N. V., & Tron, V. V. (2017). Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 175–182. doi:10.15588/1607-3274-2017-3-19.
 9. Azaryan, A. (2019). Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (99)), 29–35. doi:10.15587/1729-4061.2019.170341.
 10. Qin, R., Li, C., Qin, Z., Zhang, Z., & Cai, J. (2024). A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution. *Radiation Physics and Chemistry*, 112–202. doi:10.1016/j.radphyschem.2024.112202.
 11. Chuong, H. D., Hai Yen, N. T., My Le, N. T., & Tam, H. D. (2020). Determining the density of liquid using gamma scattering method. *Applied Radiation and Isotopes*, 163, 109-197. doi:10.1016/j.apradiso.2020.109197.
 12. Shi, C. (2024). Deep learning based Compton backscatter imaging with scattered X-ray spectrum data: A Monte Carlo study. *Radiation Physics and Chemistry*, 112–148. doi:10.1016/j.radphyschem.2024.112148
 13. Huang, H. (2024). Online analysis of iron ore slurry using PGNAA technology with artificial neural network. *Nuclear Engineering and Technology*. doi:10.1016/j.net.2024.02.046.
 14. Manjunatha, M. (2019). XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2192–2200. DOI:10.1016/j.jmrt.2019.01.022.

Albert Azaryan, Prof., DSc., **Dmitriy Shvets**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Annait Trachuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Shvydkyi**²

¹*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

²*LLC “Rudpromgeofizyka”, Kryvyi Rih, Ukraine*

Operational Control of Iron Content in Classifier Overflow Pulp using Gamma Radiation

The objective of the work is to study the possibility of real-time control of the mass fraction of iron in the multiphase medium using the gamma absorption method. The object of the research is the process of monitoring the iron content in the classifier drain pulp of an ore beneficiation plant. The research subject is the means of controlling the parameters of technological processes in concentrating factories based on nuclear-physical methods. The research methods are statistical analysis and laboratory studies of the factors affecting the accuracy of the gamma absorption method for determining the content of the valuable component in iron ore pulp.

During the work, an investigation was conducted on the possibility of real-time control of the iron content in the multiphase medium using the gamma absorption method. A gamma radiation sensor was developed to study the energy spectra of transmitted and scattered gamma radiation from various ionizing radiation sources at the boundaries of the multiphase medium. A device for real-time determination of the iron content in iron ore pulp under the conditions of a concentrating factory was considered, and the influence of disturbing factors on the control accuracy was investigated. Sets of samples were prepared with the iron content characteristic of concentrate, feed ore, and beneficiation tailings. Experimental studies were carried out on the influence of the iron ore pulp density and its solids on the intensity of the registered gamma radiation when using the gamma absorption control method.

As a result of the investigations, average values of the intensity sensitivity to changes in iron content for different solid levels in the sample were obtained. The sensitivity of intensity to changes in density at a fixed iron content in the solids was established. It was found that the maximum sensitivity for iron determination is observed at low iron contents, with a minor effect of density (1% change in density \approx 1.5...2% change in iron content).

The experiments confirmed the potential of using the gamma absorption method to determine the iron content only in the case of constant pulp density or introducing a correction for the actual density value.

nuclear physics methods, gamma radiation, quality control, pulp

Одержано (Received) 24.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

Volodymyr Hvozdetzkyi¹, PhD tech. sci., Alexander Lukyanenko¹, PhD tech. sci., Serhiy Markovych², Assoc. Prof., PhD tech. sci., Mykhailo Student¹, Prof., Dr. tech. sci., Khrystyna Zadorozhna¹, PhD tech. sci., Nestor Mozola¹

¹Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, L'viv, Ukraine

²Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Surface Topography of Arc-Sprayed Coatings by Cored Wires of Different Compositions and Its Influence on the Wear Mechanism

The purpose of this work is to study the influence of the components of the composition of powder wires on the surface characteristics of sanded electric arc coatings. For the application of coatings used electric spray and powder wires with a diameter of 1.8 mm containing powders FeSi, FeTi, FeMn, pure metals Al and Cr and carbide B4C with a filling factor reached 24%. Spray parameters: current – 150 A, voltage – 32 V, air stream pressure – 0.6 MPa, spray distance – 120 mm. The surface topography revealed the plate structure of the coating with slats of different chemical composition. In coating are presence of carbides and borides, a significant amount of iron oxides and oxides of alloyed elements at the slats. Provisions from a considerable height contribute to intense wear due to reducing the friction steam surface. The interaction is regulated by the ratio of the depth of the projections (H) to the radius of its sharp tip (r). When $H/r < 0.02$, there is only elastic interaction, with the material of counteraction elastic. In the range of $0.02 < H/r < 0.7$, the projections induce plastic deformation of the counter-body. If $H/r > 0.7$, sharp projections are cut to the surface, generating micro-cutting. Reducing the number and size of inclusions and increasing their rounding radii are critical for improving wear resistance. The coating contains complex mixtures of Fe-Cr oxide. The connection of chromium and aluminum oxides resist cutting, they will either break, forming surface ulcers or residual projections. Adding a ferromanganese to the wires produces manganese oxides with low micro-service, which do not form the cutting of the edges during friction. Titanium applications that respond quickly with oxygen leads to a subtle formation of dispersed oxide inclusions based on those (7 GPa). These manganese and titanium oxides do not generate sharp cutting edges, reducing the surface roughness of making the coating more suitable for use in friction pairs.

electric coatings, powder wires, surface roughness, element oxides, wear mechanism

Introduction. Electro-arc coating (EAC) using cored wires (CW) are widely applied for restoring shaft-type components that operate under high specific loads in extreme lubrication conditions. Among gas-thermal coating methods, electric arc spraying method (EAM) is the most commonly used. EAM offers several advantages over other gas-thermal methods, including a simple technological process, minimal costs, high productivity, the ability to form coatings of the required thickness (0.1–10 mm) with specified properties, and minimal heating of parts (up to 150°C). Consequently, EAM enables the restoration of worn parts and enhances their wear resistance. The quality of the polished EAC surface directly affects the durability of friction pairs. Therefore, this study aims to investigate how the components of CW charge influence the polished surface characteristics of EAC.

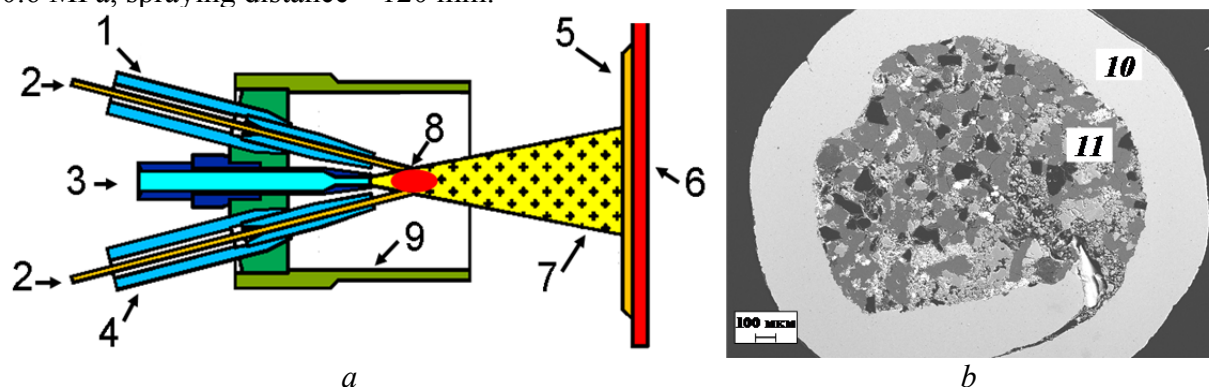
Statement of the problem. Recently, electric arc spraying of powder-cored wire (CW) coatings has been considered by many industries as the most optimal method of restoring and improving the performance characteristics of parts, in particular shafts, due to its economic advantages in terms of production and maintenance. This is also due to the simplicity and availability of equipment; the quality of coatings is practically not inferior to coatings applied by the plasma method; higher thermal efficiency, reaching 57% compared to 13 and 17% for gas and plasma application; high productivity (3...4 times higher than for plasma spraying). In the process of spraying coatings, intensive oxidation of molten droplets by oxygen from an air jet occurs, which causes the appearance of solid oxides in the structure

of the coatings (microhardness 2000 HV or chromium 3000 HV). During the grinding process, such sedimentary inclusions are not cut by the abrasive grains of the corundum grinding wheel (microhardness 2000 HV) since their hardness is equal to or higher than the hardness of corundum. In this case, the ground surface of the coatings has increased roughness and as a result, increased wear of the friction pair occurs. Therefore, it is important to form the charge of CW so that chromium or aluminum oxides are not formed during the spraying of CW coatings.

Analysis of recent research and publications. The use of special powder-cored wires for electric arc spraying of coatings allows to obtain wear-resistant coatings with hardness up to 1300 HV, and adhesion to the steel base up to 55 MPa [1–2]. Electric arc coatings with CW are widely used for protection against gas corrosion and gas-abrasive wear of heating elements of thermal power plants [3–4], protection against corrosion-abrasive wear of equipment for pumping wastewater [5], shaft parts restoration of equipment of food processing enterprises, mining and transport enterprises [6–9]. When restoring shaft-type parts, finishing treatment by grinding is provided. The ground surface of CW coatings has a significantly higher roughness, which negatively affects the tribological characteristics of the restored parts. There is no information in the literature on the influence of the CW charge on the quality of the ground surface of electric arc coatings.

Problem statement. To obtain high tribological characteristics of restored shaft-type parts by the method of electric arc spraying of coatings from CW, it is necessary to ensure the minimum roughness of the polished surface of the coatings, which depends on the nature of the CW charging materials. Therefore, the aim of the work is to study the influence of CW charging materials on the roughness of the polished surface of sprayed coatings.

Arc Spraying of Coatings Using Cored Wires. For EAM spraying, an electric metal-spraying device (Fig. 1 *a*) and CW with a 1.8 mm diameter were used. The CW charge included powders of ferroalloys (FeSi, FeTi, FeMn), pure metals (Al, Cr), and B₄C carbide, while the shell was made of a 10 mm-wide strip of 08kp steel with a thickness of 0.4 mm. The cross-section of the CW is shown in (Fig. 1 *b*). The CW charging coefficient reached 24%. The spraying parameters were as follows: current – 150 A, voltage – 32 V, air jet pressure – 0.6 MPa, spraying distance – 120 mm.



1 – cathode; 2 – PW; 3 – compressed air; 4 – anode; 5 – coating; 6 – substrate; 7 – molten metal;
8 – electric arc; 9 – protective casing; 10 – shell; 11 – powder charge.

Figure 1 – Typical scheme of an electric metal-spraying device for EAC (*a*)
and cross-section of the CW (*b*)

Source: developed by the authors

Experimental Results. During the development of CW for EAC spraying, the influence of CW charge components on the surface topography of coatings after grinding was examined. Surface cleanliness and roughness significantly affect the tribological properties of friction pairs (e.g., shaft – counter-body interfaces). Electron microscopy of the polished EAC

surface revealed numerous depressions (pores) at low resolution (Fig. 2 *a*) and protrusions at higher resolution (Fig. 2 *b*).

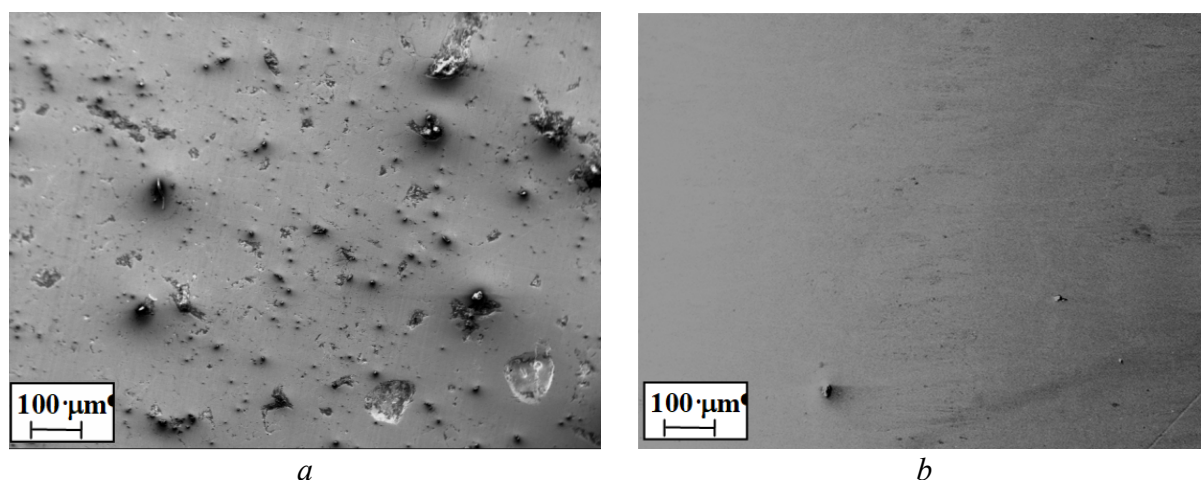


Figure 2 – EAC surfaces made of Cr6B3Al6 CW (*a*, *b*) after grinding and polishing.
Depressions (*a*) and protrusions (*b*) on the EAC surface

Source: developed by the authors

The observed surface topography is associated with the lamellar structure of EAC. These lamellae typically have different chemical compositions and microhardness levels. Despite the presence of carbides and borides, a significant amount of iron oxides and alloying element oxides were found primarily at lamella boundaries. These high-strength yet brittle coating components fracture easily during mechanical processing, creating depressions. Simultaneously, unbroken high-hardness protrusions contribute to intense wear by detruncating the friction pair surface.

After identical mechanical processing (grinding followed by polishing), the roughness of the EAC surface sprayed with Cr6B3Al6 CW was significantly higher (Ra 1.88) than that of hardened 100Cr1,5 steel (Ra 0.88). Protrusions up to 1 μm high and depressions up to 1.6 μm deep were recorded on the EAC surface, whereas surface relief variations on the steel did not exceed 0.25 μm (Fig. 3).

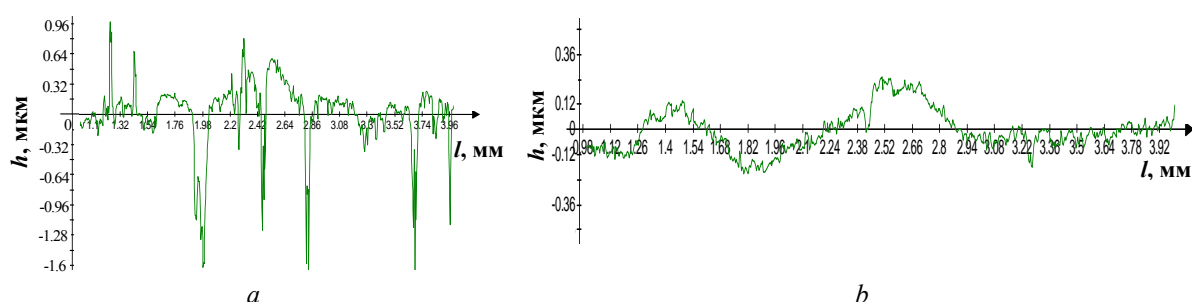


Figure 3 – Surface profiles of EACs made of Cr6B3Al6 CW with a roughness of Ra 1.88 (*a*) and steel 100Cr1,5 with a roughness of Ra 0.88 (*b*) after grinding and polishing. The ordinate axis shows the difference in relief heights on the surfaces, μm , and the abscissa axis shows the length of the path along which the measurements were made, μm .

Source: developed by the authors

Influence of Surface Topography on Wear Mechanisms. The non-uniform coating surface topography presents both advantages and disadvantages. Under boundary friction at high specific loads, sharp protrusions may act as cutting edges, leading to catastrophic counter-body wear and friction pair failure. However, surface depressions serve as reservoirs

for lubricant, enhancing lubrication film thickness and improving performance under insufficient lubrication conditions.

The frictional interaction between the polished coating surface and the counter-body is governed by the ratio of the protrusion depth (H) to the radius of its sharp tip (r). When $H/r < 0.02$, only elastic interaction occurs, with the counter-body material rebounding elastically. In the range of $0.02 < H/r < 0.7$, protrusions induce plastic deformation of counterbody. If $H/r > 0.7$, sharp protrusions cut into the counter-body surface, generating microchips.

For the “EAC–bronze BRS-30” friction pair, the maximum specific load under boundary lubrication conditions is typically below 14 MPa. Higher loads result in catastrophic wear due to counter-body surface cutting by oxide, carbide, or boride protrusions. Thus, reducing the number and size of these inclusions and increasing their rounding radii are critical for improving the wear resistance of EAC – counter-body systems.

Chemical Composition of Protrusions Remaining After Polishing. During EAC spraying, CW melts in the arc and is dispersed by an air jet into droplets of various sizes (Fig. 4 *a*). These droplets interact intensively with atmospheric oxygen, leading to different their oxidation levels (Fig. 4 *b*).

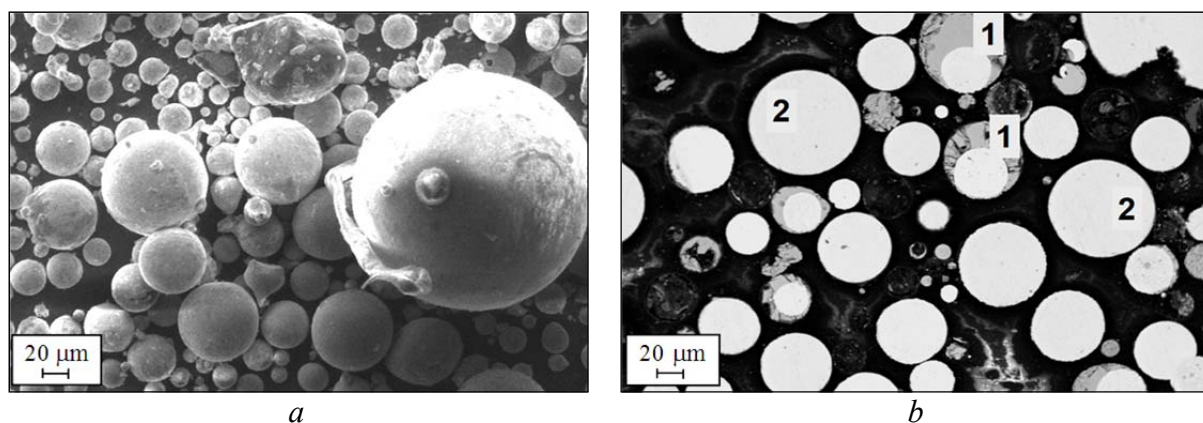


Figure 4 – Morphological features (*a*) and cross-section of droplets (*b*) from 60Kh6R3Yu6 PW, trapped in to snow target to accelerate their crystallization. 1 – droplets with complete or partial surface oxidation; 2 – absence surface oxidation

Source: developed by the authors

Thermodynamic analysis shows that aluminum reacts rapidly with oxygen, forming large, high-hardness (20 GPa) aluminum oxide inclusions. Chromium-rich CW charges produce even harder (30 GPa) chromium oxide inclusions (Fig. 5 *a*). In most cases, coatings contain complex Fe-Cr oxide mixtures. Grinding with corundum abrasive wheels (20 GPa) leaves protrusions on the surface, which act as cutters at high loads. Since hard chromium and aluminum oxides resist cutting, they either break off, forming surface ulcers, or fragment into sharp residual protrusions.

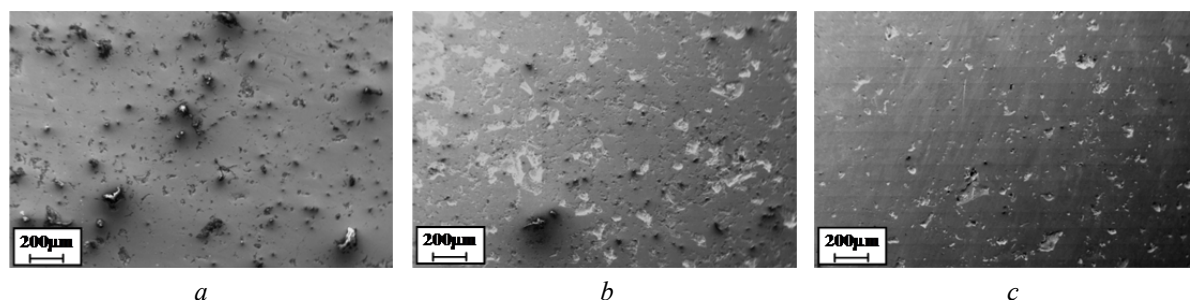


Figure 5 – Surface topography of the polished surface of coatings from Cr6B3Al6 CW (*a*), Cr6B3MnSi CW (*b*) and Cr6B3MnSiT CW (*c*), which differed by content of alloying elements

Source: developed by the authors

Adding ferromanganese to the CW charge produces manganese oxides with lower microhardness, which do not form cutting edges during friction (Fig. 5 *b*). CW containing titanium, which rapidly reacts with oxygen, results in finely dispersed Ti-based oxide inclusions (7 GPa) (Fig. 5 *c*). These manganese- and titanium-based oxides do not generate sharp cutting edges, reducing surface roughness and making these coatings more suitable for use with standard counter-bodies.

Conclusions. The surface topography revealed a plate lath-like coating structure with different chemical composition and micro-confirmation. The presence of carbides and borides, a significant amount of iron oxides and oxides of alloyed elements at the slats.

It is determined that the coating with microvoids on the basis of chromium and aluminum oxides resist abrasive grinding and act as the edges of cutting in friction vapors, causing intense wear, which at the same time accelerates the process of grinding surfaces stabilizing the coefficient.

The addition of ferromanganese or ferrotitanium to the composition of powder wires, forms finely dispersed oxides with low microhardness, which are easily subjected to wear, which leads to low surface roughness and improving tribological characteristics.

A means of assessing the resistance to the wear of the coatings in the form of the ratio of the depth of the projections (H) to the radius of its acute tip (r) was developed. When $h/r < 0,02$, there is only elastic interaction, with the material of counteraction elastic. In the range of $0,02 < H/r < 0.7$, the projections induce plastic deformation of the counterpart. If $h/r > 0.7$, sharp projections are cut to the surface, generating microchips.

The study was financed by the National Research Fund of Ukraine as part of the project No. 2022.01/0005: "The concept of restoration and prolonged operational life of equipment of the most important sectors of the national economy of Ukraine".

List of references

1. Ndumia J.N., Kang M., Gbenontin B.V., Lin, J., Nyambura S.M. A review on the wear, corrosion and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings. *Nanomaterials*. 2021, 11, P. 2527. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano11102527>.
2. Student M.M., Markovych S.I., Hvozdet'skyi V.M., Kalakhan O.S., Yuskiv V.M. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings. *Materials Science*, 2022, 58(1), P. 96–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00673-1>.
3. Stupnyts'kyi T.R., Student M.M., Pokhmurs'ka H.V., Hvozdet'skyi V.M. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings. *Materials Science*. 2016, 52(2), P. 165–172. DOI: 10.1007/s11003-016-9940-3.
4. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький та ін. Львів : Простір-М, 2018. 335 с.
5. Студент М.М., Маркович С.І., Гвоздецький В.М. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. № 1. С. 90-97.
6. Lima C., Libardi R., Camargo R., Fals H., Ferraresi V., Thern J. Assessment of abrasive wear of nanostructured WC–Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray. *Spray Techn.* 2014, 23, Article number: 10971104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0132-7>.
7. Student M., Hvozdet'skyi V., Stupnytskyi T., Student O., Maruschak P., Prentkovskis O., Skačkauskas P. Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions. *Coatings*. 2022, 12(7), P. 925. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12070925>.
8. Студент М.М. Вплив діаметра електродних порошкових дротів на механічні характеристики електродугових покриттів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 32-44.
9. Arizmendi-Morquecho A., Campa-Castilla A., Leyva-Porras C., Josué Almicar Aguilar Martínez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, López L. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/521361>.

References

1. Ndumia, J. N., Kang, M., Gbenontin, B. V., Lin, J., & Nyambura, S. M. (2021). A review on the wear, corrosion, and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings. *Nanomaterials*, 11, Article 2527. <https://doi.org/10.3390/nano11102527>.

2. Student, M. M., Markovych, S. I., Hvozdet'skyi, V. M., Kalakhan, O. S., & Yuskiv, V. M. (2022). Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallized composite coatings. *Materials Science*, 58(1), 96–104. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00673-1>.
3. Stupnyts'kyi, T. R., Student, M. M., Pokhmurs'ka, H. V., & Hvozdet'skyi, V. M. (2016). Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings. *Materials Science*, 52(2), 165–172. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9940-3>.
4. Student, M. M., Pokhmurska, H. V., Hvozdet'skyi, V. M., et al. (2018). Multifunctional electric arc coatings [Monograph]. Lviv: Prostir-M [in Ukrainian].
5. Student, M. M., Markovych, S. I., & Hvozdet'skyi, V. M. (2022). Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallized composite coatings. *Physicochemical Mechanics of Materials*, (1), 90–97 [in Ukrainian].
6. Lima, C., Libardi, R., Camargo, R., Fals, H., & Ferraresi, V. (2014). Assessment of abrasive wear of nanostructured WC–Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23, 1097–1104. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0132-7>
7. Student, M., Hvozdet'skyi, V., Stupnyts'kyi, T., Student, O., Maruschak, P., Prentkovskis, O., & Skačkauskas, P. (2022). Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions. *Coatings*, 12(7), Article 925. <https://doi.org/10.3390/coatings12070925>.
8. Student, M. M. (2020). Influence of electrode powder wire diameter on the mechanical characteristics of electric arc coatings. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (3(34)), 32–44 [in Ukrainian].
9. Arizmendi-Morquero, A., Campa-Castilla, A., Leyva-Porras, C., Aguilar Martínez, J. A., Vargas Gutiérrez, G., Moreno Bello, K. J., & López, L. (2014). Microstructural characterization and wear properties of Fe-based amorphous-crystalline coating deposited by twin wire arc spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, Article 521361. <https://doi.org/10.1155/2014/521361>.

В. М. Гвоздецький¹, канд. техн. наук, **О. Г. Лук'яненко**¹, канд. техн. наук,
С. І. Маркович², канд. техн. наук, **М. М. Студент**¹, проф., д-р техн. наук,
Х. Р. Задорожна¹, канд. техн. наук, **Н. З. Мозола**¹

¹Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Поверхнева топографія електродугових покриттів з різних композицій порошкових дротів та її вплив на механізм зносу

Робота присвячена дослідженню впливу компонентів складу порошкових дротів на поверхневі характеристики відшліфованих електродугових покриттів. Для нанесення покриттів застосовувався електродуговий розпилювач та порошкові дроти діаметром 1,8 мм, що містять порошки FeSi, FeTi, FeMn, чисті метали Al і Cr та карбід В₄С з коефіцієнтом наповнення досяг 24%. Параметри розпилення: струм – 150 А, напруга – 32 В, тиск повітряного струменя – 0,6 МПа, відстань розпилення – 120 мм.

Топографія поверхні виявила пластинчасту структуру покриття з ламелями різного хімічного складу і мікротвердості, наявність карбідів та боридів, значну кількість оксидів заліза та оксидів легованих елементів на межах ламелей. Виступи з значної висоти сприяють інтенсивному зносу через зменшення поверхні пари тертя. Западини слугують резервуарами для мастила, посилюючи товщина плівки змащення. Взаємодія регулюється співвідношенням глибини виступів (H) до радіуса його гострого наконечника (r). Коли $H/r < 0,02$, відбувається лише еластична взаємодія, при цьому матеріал протидії еластично відновлюється. В діапазоні $0,02 < H/r < 0,7$ виступи індукують пластичну деформацію контртіла. Якщо $H/r > 0,7$, різкі виступи вриваються на поверхню, генеруючи мікрорізання. Зменшення кількості та розміру включень та збільшення їх радіусів округлення є критично важливими для поліпшення стійкості до зносу.

Покриття містять складні суміші оксиду Fe–C–Cr. З'єднання хрому та оксиди алюмінію протистоять різанню, вони або зламуються, утворюючи виразки поверхні, або залишкові виступи. Додавання фероманганцю до складу дротів виробляє оксиди марганцю з низькою мікротвердістю, які не утворюють різання країв під час тертя. Додатки титану, який швидко реагує з киснем, призводить до тонко утворення дисперсних оксидних включень на основі Ti (7 ГПа). Ці оксиди на основі марганцю та титану не генерують різких країв різання, зменшують шорсткість поверхні роблячи покриття більш придатними для використання в парах тертя.

Покриття з мікровиступами на основі оксидів, протистоять абразивному шліфуванню та діють як край різання у парах тертя. Включення фероманганцю або феротитану в склад дротів, утворює дрібно дисперсні оксиди з низькою мікротвердістю, які легко піддаються зносу, що призводить до низької шорсткості поверхні та покращення трибологічних характеристик.

електродугові покриття, порошкові дроти, шорсткість поверхні, оксиди елементів, механізм зносу

Одержано (Received) 14.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

О. Є. Марков¹, проф., д-р техн. наук, Є. С. Музикін², П. С. Музикін²

¹Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна

²ТОВ «Дніпровський електро-механічний завод», м. Дніпро, Україна

e-mail: oleg.markov.omd@gmail.com, metalworkingplant@gmail.com

Формозміна пустотілих поковок по типу гільз у процесі протяжки без оправки бійками зі скосами

У статті розроблено новий техпроцес деформування поковок по типу довгих гільз ромбічними бойками з ухилами. Вивчення процесу деформування дозволило з'ясувати закономірності формозмінення пустотілої заготовки для нового технологічного процесу. Досліджувалися кути вирізів та ухилів бойків (10°, 20° і 30°) і довжина подачі заготовки у бойки. При подачах, що дорівнюють 0,1D та кути вирізу ромбічних бойків в 115° проходить мінімальне закриття отвору пустотілої заготовки. Ефективною геометрією деформуючого інструменту для збільшення коефіцієнту витяжки при деформуванні пустотілих гільз слід використовувати ромбічні бойки з ухилом скосів 10...20° і довжиною подачі заготовки $b/D=0,1$. Кривизна торця отвору дорівнює припуску на мехобробку, що забезпечує отримання потрібних розмірів і форми поковки без використання оправки.

деформування, внутрішній отвір, протяжка, МСЕ, деформації, оправка

Постановка проблеми. Для підвищення обороноздатності України слід розробляти нові ресурсозберігаючі технологічні процеси штампування артилерійських снарядів. Але на сьогодні немає науково-обґрунтованої концепції серійного виробництва таких виробів, що дозволяло б виготовляти снаряди у великій кількості, високої якості та з низькою собівартістю. Проектування нових технологічних процесів одержання даних поковок без оправки потребує проведення комплексних досліджень та розробки рекомендацій для їх реалізації. Тому розробка науково-обґрунтованої методики проектування технологічних процесів деформування порожнистих циліндрів з метою інтенсифікації деформування при зниженні енергоємності та трудовитрат є актуальним завданням і становить великий науковий та практичний інтерес.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесів деформування порожнистих циліндричних заготовок без оправки за допомогою науково-обґрунтованого проектування режимів їх деформування на базі створених чисельних моделей, що дозволяють розробити та оцінити новий технологічний процес деформування таких поковок. Новий технологічний процес деформування підвищить конкурентоспроможність вітчизняної продукції, що дозволить збільшити обсяг експорту унікальної продукції на зовнішньому ринку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основним завданням розвитку спеціального машинобудування є виведення його на принципово нові ресурсозберігаючі технології, що забезпечують підвищення продуктивності праці, економію матеріальних та енергетичних ресурсів [1]. Значною мірою вирішенню цих завдань сприяє впровадження у промисловість прогресивних технологій деформування [1]. Серед таких поковок посідають пустотілі поковки з дном, по типу артилерійських гільз та снарядів. Даний тип поковок має низький коефіцієнт використання металу ($K_{vm} = 0,15 \dots 0,3$) через відходи, які пов'язані з прошивкою отвору і додатковими припусками на механічну обробку [3]. Збільшений припуск викликаний застосуванням конусних оправок для виключення заковування отвору при протяжці. Обмеженням застосування оправок є неможливість отримання в поковках отворів діаметром менше

90 мм [4]. Насправді в таких поковках отвір закривають напуском і одержують його висвердлюванням суцільного циліндра, отриманого деформуванням в комбінованих бойках [5]. Зменшити витрату металу можна за рахунок формування отвору в поковці без застосування оправки [6].

Операція прошивки отвору вимагає значних зусиль, що іноді перевищують можливості чинних пресів. У таких випадках для одержання порожнистих заготовок потрібного діаметра доводиться вводити додаткову операцію - розкочування попередньо прошитих заготовок, що збільшує трудомісткість [2]. Для усунення зазначених недоліків у цій роботі розробили та випробували комплексну технологію виготовлення товстостінних порожнистих заготовок із спеціальної заготовки з глухою порожниною, що забезпечує поліпшення технологічності процесу, економію металу та зниження трудомісткості.

Метод прошивки заготовки в контейнері, розроблений у роботі [8], має ряд істотних недоліків, пов'язаних з нерівномірним розподілом в тілі поковки накопиченими деформаціями та наявністю неметалевих включень. Автори роботи [9] запропонували новий спосіб отримання поволок труб, який полягає у осадженні заготовки у контейнері, з витісненням металу дефектної зони у вільну порожнину контейнера. Цей спосіб дозволяє, порівняно з існуючим, знизити різновісність поковки, розташувати дефектну зону в місці технологічного відходу поковки (в донній частині) і виключити дефекти на внутрішній поверхні гільзи, зменшити технологічні припуски та збільшити коефіцієнт використання металу.

У роботі [10] запропоновано спосіб виготовлення порожнистих поволок, близьких до профілю готових деталей, який дозволяє підвищити використання металу на сучасних радіально-обтискних машинах бойками зі скосами. А у роботі [11] була запропонована нова технологія деформування порожнистих циліндрів. Принциповою відмінністю запропонованої технології від загальноприйнятої є: зміна послідовності операцій деформування; застосування підігріву до температури 1000°C, яка є температурою подальшої термічної обробки і не призводить до значного зростання зерна; відмова від проміжних термічних обробок. Тривалість термічного циклу деформування при такому процесі скоротилася. Новий процес отримання безшовних товстостінних пустотілих заготовок великого діаметру був розроблений у роботі [12]. Метод принципово відрізняється тим, що виготовлення поволок відбувається із заготовок прошивкою в матриці на вертикальному гідравлічному пресі та протяжкою отриманої гільзи на горизонтальному гідравлічному пресі. Якість поволок, одержаних новим методом, характеризується високим рівнем механічних властивостей та однорідністю складу.

Постановка завдання. Для потреб спеціального машинобудування часто потрібні поковки порожнистих циліндрів із «глухим» дном. З таких поволок виготовляються гільзи, циліндри, плунжери гідравлічних пресів та інші деталі. Недолік існуючої технології із заковуванням дна полягає в тому, що на внутрішній поверхні неминуче утворюються складки та тріщини. Автори роботи [13] запропонували нову технологію виготовлення порожнистих циліндричних заготовок з «глухим» дном, що дозволяє виключити ці недоліки. Спосіб деформування порожнистих циліндрів без оправки є новим і невивченим. У процесі деформування без оправки відбувається заковування отвору та збільшення стінки вихідної заготовки. Це становить велику складність при проектуванні технологічного процесу згідно цього способу. Слід встановити механізм зміни діаметра отвору прошитої заготовки залежно від відомих розмірів поковки режимів деформування та геометрії інструменту [14]. Тому необхідно визначити, як

впливає протяжка вирізними бойками зі скосами на заковування отвору в залежності від вихідних розмірів заготовок, кута вирізу бойків, величини обтискання та подачі.

Виклад основного матеріалу. Дослідження процесів протяжки здійснювалося методом скінчених елементів. Вихідні дані для розрахунку: сталь 50X, $t=1200^{\circ}\text{C}$; $v = 40 \text{ мм / с}$. Температурний інтервал деформування $1200\text{...}800^{\circ}\text{C}$, щільність при кімнатній температурі 7840кг/м^3 ; модуль Юнга $2\cdot 10^5 \text{ МПа}$. Заготовки протягувалися вирізними бойками з кутами вирізу 90° , 115° , 140° і різної довжини горизонтальної полиці деформуючої частини, яка визначає величину подачі $b = 0,1D$; $0,2D$; $0,3D$. Досліджувана схема протяжки представлена на рисунку 1. У дослідженні використовувалися циліндричні сталеві порожнисті моделі. Діаметр заготовок $D = 500 \text{ мм}$, а відносний діаметр внутрішнього отвору (d_0 / D) варіювався в діапазоні $0,3$; $0,5$; $0,8$; висоти заготовок становили $H_1 = 480$; 286 ; 238 мм для забезпечення однакового об'єму заготовки при різних діаметрах отворів. Досліджувався вплив трьох факторів, що варіювалися на трьох рівнях. Результати розрахунку – ступінь та інтенсивність заковування отвору при протяжці без оправки бойками зі скосами. Ступінь деформації заготовки становила 20% , 40% та 60% .

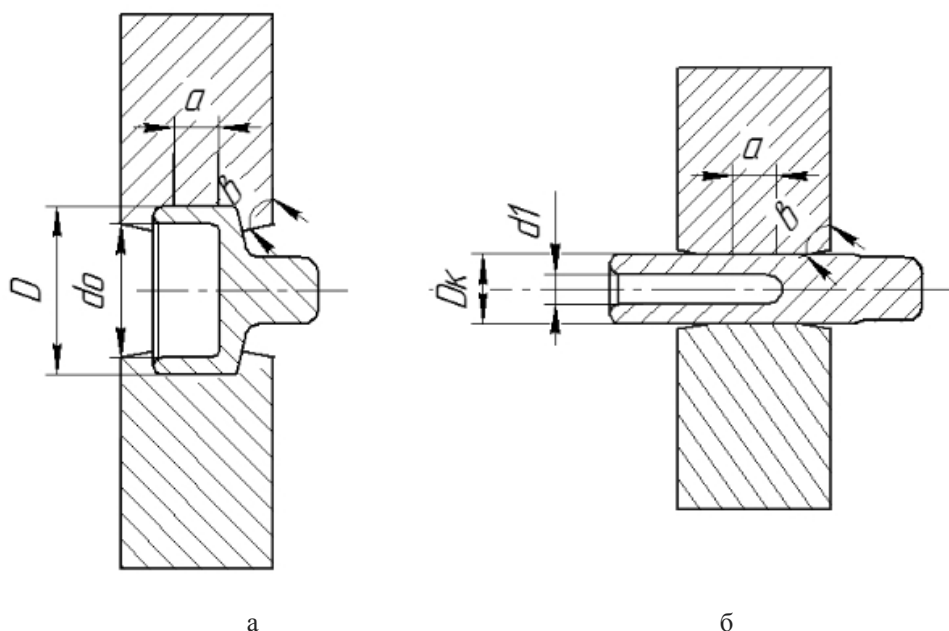


Рисунок 1 – Схема процесу протяжки на початковому (а) та завершальному (б) етапі

Джерело розроблено авторами

В результаті дослідження повинні бути надані рекомендації для проектування нового технологічного процесу деформування пустотілих циліндрів без оправки. Процес деформування порожнистих поковок без оправки характеризується тривимірним плином металу при протяжці. Протяжка заготовки вирізними бойками призводить до її подовження та збільшення товщини стінки. На формозміну порожнистої заготовки в процесі деформування впливають форма вихідної заготовки, режими деформування (подача, кантування, обтиснення) та геометрія інструменту.

Вихідні дані для проектування технологічного процесу – зовнішній та внутрішній діаметри поковки. Розрахунок процесу протяжки пустотілих глухотілих поковок без оправки є складним дослідницьким завданням. Це викликано впливом

великої кількості факторів на цей процес. Задля реалізації процесу моделювання необхідно вибрати значні чинники. Аналіз технологічних процесів деформування пустотілих циліндрів показав, що основними факторами, що впливають на формозміну заготовки в процесі деформації є: відносний діаметр отвору в заготовці (d_0/D), кут вирізу бойків (α) та відносна подача (a/D). На формозміну у процесі протяжки вирізними бойками також впливає величина сумарного обтиснення заготовки (ϵ). Інтервал варіювання для першого фактору вибрано з умови максимального та мінімального значення товщини стінки заготовки. Застосування для деформування порожнистих заготовок з тонкою стінкою ($d_0/D > 0,8$) призведе до сплющування заготовки, при якому не відбуватиметься деформування стінки. При значних товщинах стінки порожнистих заготовок ($d_0/D < 0,25$) відбуватиметься інтенсивне заковування отвору при протяжці вирізними бойками. Тому інтервали варіювання першого фактору обрані в цьому діапазоні (табл. 1).

Ефективність протягування заготовок залежить від кута вирізу бойків. Інтенсивна витяжка відбуватиметься при куті вирізу бойків, проте ці бойки менш універсальні і потребують частішої зміни бойків при куванні при заданих обтисканнях заготовки. Забезпечити універсальність вирізних бойків можна за рахунок збільшення кута вирізу. При збільшенні кута вирізу бойків схема деформування наближається до деформування плоскими бойками, що супроводжується інтенсивним розширенням і, відповідно, сплющуванням пустотілої заготовки, а не її витяжкою. Виходячи з даних обмежень, було обрано відповідний інтервал для цього фактору (табл. 1).

Зміна діаметра отвору в заготовці залежить від ступеня деформації (обтискання). На практиці при деформуванні пустотілих поковок змінення відношення площ поперечного перерізу становить 2,0...3,5. Цій величині деформації відповідає обтискання в діапазоні 20...60%. Інтенсифікувати витяжку при протяжці, а, відповідно, знизити ступінь заковування отвору в заготовці можна за рахунок застосування вирізних бойків зі скосами. При цьому буде зменшуватися величина подачі заготовки у бойки. З досвіду деформування плит плоскими бойками зі скосами ефективний кут становить 10...30° [15]. Відносна подача становить 0,1; 0,2; 0,3 від діаметра заготовки, відповідно. Тому дослідження можна розділити на три схеми, при яких варіюватиметься величина подачі. Таким чином, виділено три основні фактори, що впливають на процес деформування порожнистих поковок без оправки (табл. 1). При плануванні математичного експерименту отримали математичну модель відносного діаметра внутрішнього отвору (d_1/D).

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання при проведенні дослідження

Фактори та рівні їх варіювання	X_1	X_2	X_3
	d_0/D	$\alpha, ^\circ$	$\epsilon, \%$
Інтервал варіювання ΔX_i	0,25	25	20
Нижній рівень $X_i = -1$	0,3	90	20
Середній рівень $X_i = 0$	0,55	115	40
Верхній рівень $X_i = +1$	0,8	140	60

Джерело розроблено авторами

Застосування нового способу деформування порожнистих циліндрів з дном виключає застосування оправки, що призводитиме до заковування отвору пустотілої заготовки і збільшення стінки поковки. Це ускладнює проектування технологічного процесу, тому необхідно встановити вплив розмірів заготовки та геометрії інструменту на заковування отвору циліндра.

Раціональними, з точки зору напружено-деформованого стану та заковування отвору заготовки, обрані бойки з кутом вирізу бойків до $\alpha = 115^\circ$ та величиною подачі $0,1D$ [14] (рис. 2). При цьому величина кінцевого відносного діаметра (d_1 / D) менша, ніж для кута вирізу $\alpha = 90^\circ$, за однакових умов деформування, і має вигляд параболи.

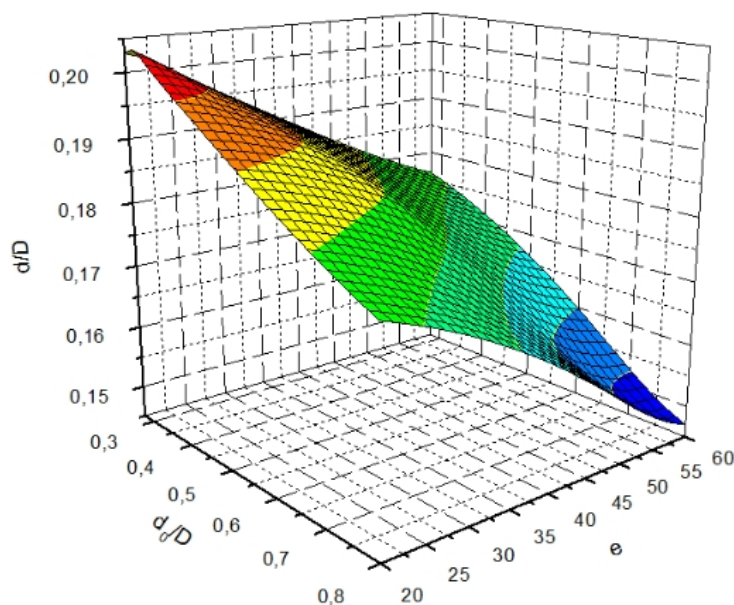


Рисунок 2 – Ступінь заковування отвору при протяжці порожнистих циліндрів бойками з кутом вирізу $\alpha = 115^\circ$ та подачею $0,1D$

Джерело розроблено авторами

Оцінку швидкості заковування отвору заготовки, для різних діаметрів отворів, необхідно проводити на підставі універсального показника, який враховуватиме інтенсивність зменшення діаметра отвору. Цей показник можна назвати – коефіцієнт інтенсивності заковування, який визначається відношенням змін площин кінцевої поковки та початкової заготовки до площі обтисненої заготовки

$$f = \frac{F_0 - F_1}{F_{обж}} = \frac{(D^2 - d_0^2) - (D_1^2 - d_1^2)}{D^2 - D_1^2}, \quad (1)$$

де D, D_1 – зовнішні діаметри вихідної та протягнутої заготовок, відповідно;
 d_0, d_1 – діаметри отворів заготовки та поковки, відповідно.

Формула (1) показує інтенсивність збільшення товщини стінки залежно від обтиснення зовнішнього діаметра заготовки, тобто відображає частку обтиснутої площі, яка йде на збільшення стінки поковки. Так при $f=0$, коли площа перерізу не змінюється, збільшення товщини стінки не відбувається і метал плине у подовження. При $f=1$, коли зміна площі заготовки в процесі деформування дорівнює площі обтискання заготовки

($F_0 - F_1 = F_{обт}$), все обтискання призводить до збільшення стінки заготовки, отже, подовження заготовки буде відсутнє.

Цей показник враховує «швидкість» заковування отвору в залежності від різної площі перерізу вихідної заготовки (товщини стінки). Для різних товщин стінок вихідної заготовки буде різним об'єм металу, що бере участь у деформації, що істотно впливатиме на заковування отвору. Оцінити інтенсивність заковування можна після аналізу тих результатів, що представлені на рисунку 3.

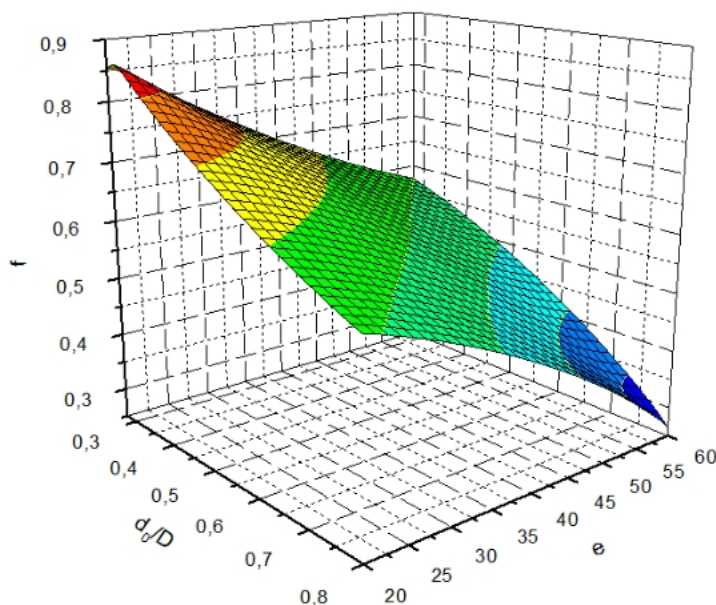


Рисунок 3 – Інтенсивність заковування отвору при протяжці порожнистих циліндрів бойками з кутом вирізу $\alpha = 115^\circ$ та подачею $0,1D$

Джерело розроблено авторами

Висновок. На підставі результатів теоретичного дослідження механізму заковування отвору циліндра була обрана ефективна схема для забезпечення мінімального заковування отвору, в якій вирізні бойки мали виріз з кутом 115° і ширину деформуючої частини $0,1D$. Загальною закономірністю для досліджуваних схем деформування є те, що інтенсивність деформування отвору однакова при різних обтисканнях при постійних співвідношеннях розмірів заготовки. При подачах більше $0,2D$ не відбувається якісної та кількісної зміни залежності ступеня та інтенсивності заковування отвору. Це дозволяє визначити рекомендовану подачу для інтенсивної витяжки заготовки та зменшення ступеня заковування отвору. Подача, що рекомендується, повинна бути в діапазоні $(0,1 \dots 0,2)D$. Таким чином, для одержання поковок з великим діаметром отвору необхідно застосовувати заготовки з великим діаметром отвору.

Наукова новизна роботи полягає у: 1) вперше був запропонований показник (f), який враховує швидкість зміни площі поперечного перерізу пустотілої заготовки при її обтисканні (формула 1); 2) отримали подальший розвиток результати, які показують, що для інструменту з кутом вирізу боків $\alpha = 115^\circ$ інтенсивність заковування отвору (f) переважно залежить від вихідного відносного діаметра заготовки (d_0/D) ніж від ступеня обтиснення; 3) вперше встановлено, що ступінь заковування збільшується, а швидкість заковування є сталою при різних значеннях обтискання, тобто діаметр заковується

практично з постійною швидкістю, що є важливим науковим спостереженням і не було відомо раніше.

Список літератури

1. Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging / [Zhu Baiqing](#), [Lu Haixing](#), [Tong Yifei](#), [Li Dongbo](#), [Xia Yong](#). *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Article ID 531756. 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.
2. Askelianets, A. Analysis of theoretic research of the ring tapered tool penetration with subsequent upsetting in the lining ring while manufacturing a disc with shoulder. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. № 4. С. 70–75.
3. Wu, Y. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process / Yunjian Wu, Xianghuai Dong, Qiong Yu. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. N 93. P. 102–110.
4. Sizek, H. W. Radial Forging. *Metalworking : Bulk Forming*. 2005. P. 172–178.
5. Ghaei, A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel / A. Ghaei, M. R. Movahhedy, A. Karimi Taheri. *Materials & Design*. 2008. № 29. P. 867–872.
6. Fan, L. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes / Lixia Fan, Zhigang Wang, He Wang. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014. N 16. P. 329–334.
7. A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuouslycast ingots / S. P. Burkin, E. A. Korshunov , V. L. Kolmogorov, N. A. Babailov, V. M. Nalesnik. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. № 58. P. 170–173.
8. Rotary swaging forming process of tube workpieces / Qi Zhang, Kaiqiang Jin, Dong mu, Pengju Ma, Jie Tian. *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014. October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. Procedia Engineering*. 2014. N 81. P. 2336–2341.
9. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / M. Sanjari, P. Saidi, A. Karimi Taheri, M. HosseinZadeh. *Materials and Design*. 2012. N 38. P. 147–153.
10. Wang, Z. G. The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel / Z. G. Wang. *Nanjing University of Science and Technology*. 2011. P. 28–30.
11. Latest Development in Railway Axle and ThickWalled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX / Frederik Knauf, PaulJosef Nieschwitz, Albrecht Holl, Hans Pelster, Rolf Vest. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, PA, USA. September 12–15*. 2011. P. 215–220.
12. Koppensteiner, R. Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product / Robert Koppensteiner, Zack Tang. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, PA, USA. September 12–15*. 2011. P. 225–229.
13. Sheu, J.J. Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation / JinnJong Sheu, SuYi Lin, ChengHsien Yu. *11th International Conference on Technology of Plasticity. ICTP 2014. 1924 October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. Procedia Engineering*. 2014. N 81. P. 688–693.
14. Jaouen, O. From Hollow Ingot to Shell with a Powerful Numerical Simulation Software Tool / O. Jaouen, F. Costes, P. Lasne, M. Barbelet. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh. PA. USA. September 12–15*. 2011. P. 513–518.
15. Li ,Y. Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thinwalled copper tube with axially inner micro grooves by radial forging / Yong Li, Ting He, Zhixin Zeng. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. N 213. P. 987–996.

References

1. Zhu Baiqing, Lu Haixing, Tong Yifei, Li Dongbo, Xia Yong. (2015). Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 531756. 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.
2. Askelianets, A. (2014). Analysis of theoretic research of the ring tapered tool penetration with subsequent upsetting in the lining ring while manufacturing a disc with shoulder. *Metallurgical and Mining Industry*, 4, 70–75.
3. Yunjian Wu, Xianghuai Dong, Qiong Yu. (2015). Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 93, 102–110.
4. Sizek, H. W. (1995). Radial Forging. *Metalworking: Bulk Forming*, 178.
5. Ghaei, A. Movahhedy, M. R., Karimi Taheri A. (2008). Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel. *Materials & Design*, 29, 867–872.

6. Fan, L., Wang Z., Wang H. (2014). 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 16, 329–334.
7. Burkin, S. P. et al. (1996). A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuouslycast ingots. *Journal of Materials Processing Technology*, 58, 170–173.
8. Zhang, Q., et al. (2014). Rotary swaging forming process of tube workpieces. *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014. October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. Procedia Engineering, N 81*, pp. 2336–2341.
9. Sanjari, M., et al. (2012). Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test. *Materials and Design*, 38, 147–153.
10. Wang, Z. G. (2011). The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel. *Nanjing University of Science and Technology*, 14, 28–30.
11. Knauf, F., et al. (2011). Latest Development in Railway Axle and ThickWalled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, PA, USA. September 12–15*, 215–220.
12. Koppensteiner, R. Tang, Z. (2011). Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, PA, USA. September 12–15*, 225–229.
13. Sheu, J.J., Lin, SuYi., Yu, C. H. (2014). Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation. *11th International Conference on Technology of Plasticity. ICTP 2014. 1924 October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. Procedia Engineering*, 81, 688–693.
14. Jaouen, O., et al. (2011). From Hollow Ingot to Shell with a Powerful Numerical Simulation Software Tool. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh. PA. USA. September 12–15*, pp. 513–518.
15. Li, Y., et al. (2013). Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thinwalled copper tube with axially inner micro grooves by radial forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 987–996.

Oleh Markov¹, Prof., DSc., **Yevhen Muzykin²**, **Pavlo Muzykin²**

¹*Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil, Ukraine*

²*Dnipro electrical and mechanical plant LLC, Dnipro, Ukraine*

Deformation of Hollow Forgings of The Sleeve Type in the Process Of Drawing Without a Mandrel by Beveled Punches

The purpose of the work is to increase the efficiency of the processes of deformation of hollow cylindrical blanks without a mandrel by means of scientifically substantiated design of their deformation modes based on the created numerical models, which allow developing and evaluating a new technological process for the deformation of such forgings. The new technological process of deformation will increase the competitiveness of domestic products, which will allow increasing the volume of exports of unique products on the foreign market. The article develops a new technological process for the deformation of forgings of the type of long sleeves with rhombic strikers with slopes. The study of the deformation process made it possible to clarify the regularities of the shape change of the hollow blank for the new technological process. The angles of the cutouts and slopes of the strikers (10°, 20° and 30°) and the length of the workpiece feed into the strikers were studied. At feeds equal to 0.1D and a cut angle of rhombic punches of 115°, the minimum closing of the hole of the hollow workpiece takes place. The effective geometry of the deforming tool to increase the extraction coefficient when deforming hollow sleeves should be rhombic punches with a bevel slope of 10...20° and a feed length of the workpiece $b/D=0.1$. The curvature of the end face of the hole is equal to the allowance for machining, which ensures obtaining the required dimensions and shape of the forging without using a mandrel. Based on the results of a theoretical study of the mechanism of forging the cylinder hole, an effective scheme was selected to ensure minimum forging of the hole, in which the cutout punches had a cut with an angle of 115° and a width of the deforming part of 0.1D. The general pattern for the studied deformation schemes is that the intensity of hole deformation is the same for different crimps with constant ratios of the workpiece sizes. At feeds greater than 0.2D, there is no qualitative or quantitative change in the degree and intensity of hole forging. This allows us to determine the recommended feed for intensive drawing of the workpiece and reducing the degree of hole forging. The recommended feed should be in the range (0.1...0.2)D.

deformation, internal hole, broaching, FEM, deformations, mandrel

Одержано (Received) 13.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.86

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.129-138](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.129-138)

І. Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, А. Б. Гупка, доц., канд. техн. наук,

С. О. Коваль, А. О. Брикса, В. М. Бучинський

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: geckoivan1@ukr.net*

Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гвинтових змішувачів

Проведено техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гвинтових змішувачів трьох типів за умови досягнення ними однакової якості змішування. Встановлено, що гвинтовий змішувач з обертовим кожухом є найбільш економічно ефективним і може забезпечувати отримання найнижчої неоднорідності суміші за найнижчих витрат. Витрати на змішування при його застосуванні є в 1,09 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем, і в 3,41 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим змішувачем з пересипом. Встановлено, що для досягнення високої якості змішування суміші жорсткими гвинтовими конвеєрами-змішувачами існують підвищені витрати на їх виготовлення та експлуатацію, пов'язані із значною довжиною траси перелопачування суміші, а у шнекових змішувачах з пересипанням існують підвищені витрати на електроенергію, враховуючи необхідність здійснення значної кількості циклів для перелопачування суміші, а також часто неможливість переміщення суміші в потрібному напрямку.

гвинтовий конвеєр-змішувач, обертовий кожух, продуктивність, неоднорідність суміші, техніко-економічне обґрунтування.

Постановка проблеми. Гвинтовим конвеєрам притаманна відносна простота і низька вартість конструкції, висока надійність і конструкційна наслідуваність, забезпечення високих екологічних норм і мінімізація пилоутворення в процесі роботи, а також можливість агрегатування з різноманітними механічними засобами у виробничих системах. Це є головною причиною їх використання в сільськогосподарському виробництві, харчовій і переробній, будівельній, хімічній, фармацевтичній та інших галузях у якості як транспортних засобів, так і технологічних при виготовленні різноманітних сумішей. У якості технологічних засобів гвинтові елементи використовуються при змішуванні, подрібнюванні, сепарації та інших технологічних операціях. Найбільшого використання у якості технологічних засобів вони набули як змішувачі матеріалів. Враховуючи необхідність підвищення економічної ефективності застосування обладнання, поєднання процесів змішування сипких матеріалів з їх переміщенням дозволяє забезпечити використання одного технічного засобу замість двох, при використанні гвинтових транспортно-технологічних конвеєрів-змішувачів.

Проте інтенсивність перемішування у таких засобах не завжди є високою і часто для отримання необхідної якості потребує значної кількості перелопачувань суміші, що вимагає або збільшення довжини технічного засобу, або забезпечення циклічності його роботи, що призводить до його використання лише у якості змішувача. Відтак, досягнути необхідної цілі в отриманні необхідної кількості перелопачувань суміші гвинтовими змішувачами невисокої довжини можна зрушенням суміші з необхідним тертям шнека з матеріалом та кожухом у гвинтових конвеєрах-змішувачах із обертовими кожухами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню процесів змішування

сипких матеріалів гвинтовими механізмами присвячені роботи Р.М. Рогатинського [1-9], В. Гудя [8-11], О. Ляшука [9, 12], Д. Дмитріва [7, 8, 13, 14], О. Гурика [15, 16], Лещука Р.Я. [18], Марунича О.П. [12, 19] та багатьох інших дослідників.

Важливим завданням їхніх досліджень був пошук шляхів забезпечення якості змішування сипких компонентів за рахунок розроблення і модернізації оригінальних конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів. При цьому не нехтувались питання продуктивності процесів як переміщення вантажів, так і їх змішування. Для забезпечення їх високих показників доцільно продовжувати науковий пошук в напрямку модернізації конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів із забезпеченням обертowego руху їх кожухів [20]. Відтак подальше дослідження та обґрунтування ефективного функціонування гвинтових конвеєрів-змішувачів із обертovими кожухами з метою підвищення їх продуктивності та якості виконання ними транспортно-технологічного процесу залишається актуальним.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення техніко-економічного обґрунтування доцільності використання гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертovими кожухами.

Виклад основного матеріалу. З метою забезпечення значної продуктивності транспортно-технологічного процесу транспортування та змішування сипких матеріалів при отриманні високої якості змішування було розроблено, запатентовано і досліджено конструкцію гвинтового конвеєра-змішувача з обертovими кожухом [20-23] (рис. 1). На відміну від існуючих конструкцій шнекових змішувачів, де високу якість змішування можна отримати або за рахунок значної довжини змішування [1], або за рахунок циклічності режиму роботи, що не забезпечує переміщення матеріалів [1], розроблена оригінальна конструкція гвинтового конвеєра-змішувача з обертovими кожухом [23] дозволяє при відносно невисокій довжині переміщення суміші добиватися, за рахунок необхідного тертя шнека з матеріалом та кожухом, необхідної кількості перелопачувань і високої якості змішування.

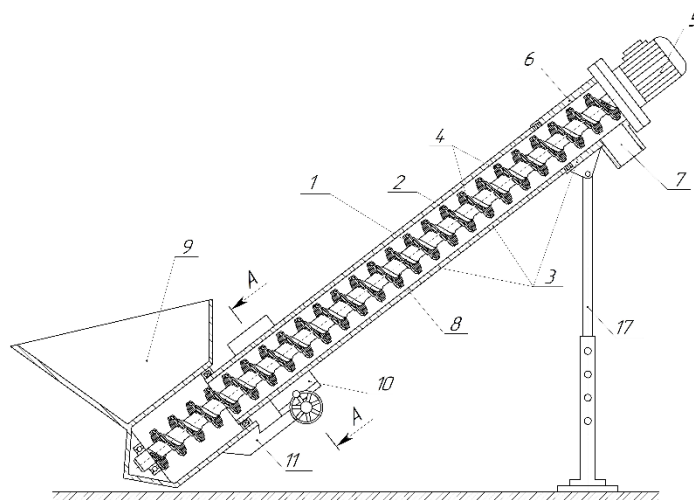


Рисунок 1 - Конструктивна схема конвеєра-змішувача з обертovим кожухом:
 1 – вал; 2 – шнек; 3 - кожух; 4 – спіраль; 5 – двигун; 6 - нерухома частина кожуха 3;
 7 - вивантажувальний патрубок; 8 - рухома частина кожуха 3; 9 – бункер; 10 - механізм
 пригальмовування рухомої частини 8 кожуха 3; 11 – кронштейн

Джерело: розроблено авторами

Тому, якщо порівнювати з точки зору техніко-економічної ефективності розроблену і досліджену конструкцію гвинтового конвеєра-змішувача з обертovими

кожухом [20-25] з існуючими варіантами гвинтових змішувачів, то можна зробити висновок, що для досягнення високої якості змішування суміші в діючих варіантах:

- жорстких гвинтових конвеєрів-змішувачів [1] існують підвищені витрати на їх виготовлення, пов'язані із значною матеріаломісткістю за рахунок значної довжини їх робочої частини, та підвищені витрати на електроенергію, враховуючи значну довжину траси перелопачування суміші від завантажувального бункера до вивантажувального вікна;

- шнекових змішувачів з пересипанням [1] існують підвищені експлуатаційні витрати, враховуючи значну кількість циклів для перелопачування суміші, а також часто неможливість переміщення суміші в потрібному напрямку і потребу у додатковому транспортері.

Відтак, проведемо порівняльний розрахунок витрат на використання жорсткого гвинтового конвеєра-змішувача [1], шнекового змішувача з пересипанням [1] і гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом [20-23] із розрахунку забезпечення ідентичної продуктивності та якості змішаної суміші.

Якщо конструкції жорстких гвинтових конвеєрів-змішувачів [1] і шнекових змішувачів з пересипанням [1] широковідомі, то гвинтові конвеєри-змішувачі з обертовим кожухом [20-25] лише досліджуються. Тому розглянемо їх детальніше. Так, на рис. 1 зображено конструктивну схему гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом (пат. України № 154380 [23]), а на рис. 2 загальний вигляд стенду [21, 22] для дослідження ефективності змішування гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом, який виготовлено на базі патенту України № 154996 [24].



Рисунок 2 - Загальний вигляд стенду гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом (проведення експерименту)

Джерело: розроблено авторами

При виконанні процесів транспортування і змішування гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовими кожухами матеріали для змішування з бункера потрапляють у зону транспортування і змішування до кожуха, по якому шнеком змішуючись переміщуються у зону вивантаження, де через вивантажувальний патрубок потрапляють назовню. При їх переміщенні зрушування суміші відбувається з відповідним тертям шнека з матеріалом та кожухом, що сприяє зрушуванню кожуха в

обертовий рух і збільшенню кількості перелопачувань суміші.

Виконаємо розрахунок і порівняння витрат на виготовлення та експлуатацію розробленого гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом [23] з існуючими моделями транспортно-технологічних гвинтових конвеєрів-змішувачів [1] та шнекових змішувачів з циклічним циклом роботи [1], при умові досягнення ними відповідної неоднорідності суміші за використання стандартних суцільних спіралей однакового типорозміру.

В результаті проведених експериментальних досліджень розробленого гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом з робочою довжиною зони змішування і переміщення суміші 1,7 м і діаметром шнека 96 мм було встановлено [22], що найнижче значення коефіцієнта неоднорідності при змішуванні трьохкомпонентної суміші сільськогосподарських матеріалів становило 7,32 % (при частоті обертання шнека 250 об/хв. і кожуха 100 об/хв.), а при змішуванні двохкомпонентної суміші становило 6,4 % (при частоті обертання шнека 250 об/хв. і кожуха 100 об/хв.).

Конструктивні параметри інших гвинтових змішувачів для отримання ідентичної неоднорідності сумішей можна встановити лише наближено. Так, в роботі [1] було встановлено, що неоднорідність двохкомпонентної суміші сільськогосподарських матеріалів отримана з допомогою жорсткого гвинтового транспортера-змішувача з робочою довжиною зони змішування і переміщення суміші – 1,97 м (рис. 3 а), коливається в межах 10,5 ... 15,1 % в залежності від частоти обертання шнека в межах 56,8 ... 227,2 об/хв. Тому, для досягнення якості суміші аналогічної, до якості отриманої в результаті її змішування гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом, процес її перелопачування повинен бути мінімум в тричі тривалішим, що відповідно відобразиться у габаритних розмірах (робочій довжині зони змішування і переміщення суміші) жорсткого гвинтового транспортера-змішувача.

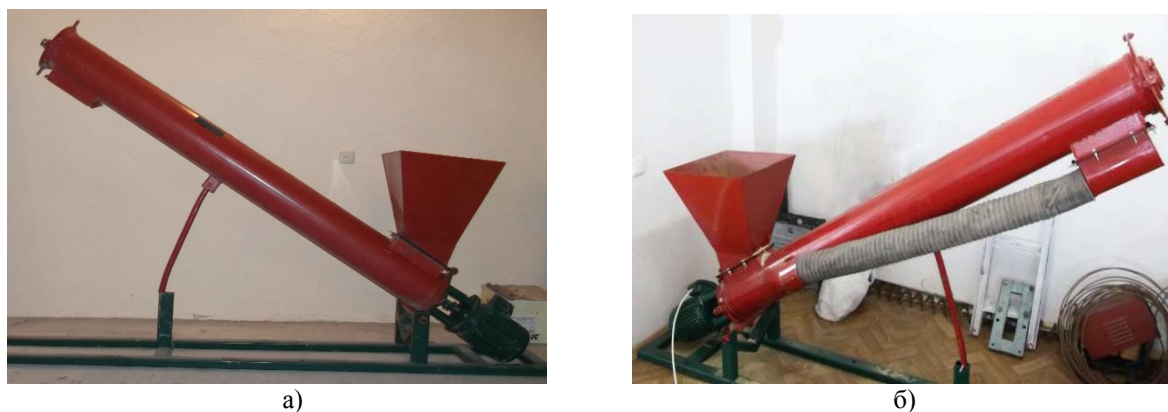


Рисунок 3 - Загальний вигляд гвинтових змішувачів: а) жорсткий транспортер-змішувач; б) змішувач з пересипом

Джерело: на підставі [1]

Також в роботі [1] було встановлено, що найнижча неоднорідність двохкомпонентної суміші сільськогосподарських матеріалів отримана з допомогою гвинтового змішувача з пересипом з робочою довжиною зони змішування і переміщення суміші – 1,97 м; кутом нахилу змішувача - 36° (рис. 3 б), при її змішуванні протягом 60 с становила 9,2 при 227,2 об/хв. обертання шнека, що є значно вищим за неоднорідність двохкомпонентної суміші отриманої при проведенні експериментальних досліджень гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом. Для покращення результату і наближення до якості суміші, отриманої в результаті її змішування

гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом, тривалість процесу змішування у гвинтовому змішувачі з пересипом повинна складати до 300 с.

При виборі гвинтових змішувачів слід враховані окремі фактори, які впливають на ефективність їх роботи, до яких доцільно віднести:

- витрати на застосування, які включають собівартість виготовлення або ціну, витрати на експлуатацію та витрати на технічний огляд і ремонт;
- якість виконання процесу змішування;
- продуктивність виконання операції змішування;
- необхідність у додатковому засобі для переміщення змішаних матеріалів (для гвинтових змішувачів з пересипом).

Провівши порівняльний аналіз щодо отримання приблизно однакової якості змішування різними гвинтовими засобами, було встановлено їх основні конструктивно-технологічні параметри, які відображено в таблиці 1. При цьому потужність приводу для усіх представлених типів гвинтових змішувачів становить 2,2 кВт, а частота обертання приводу - 1500 об/хв., що дозволить з допомогою пасової передачі та шківів відповідних діаметрів отримати вихідну частоту обертання шнека 250 об/хв.

Таблиця 1 - Основні конструктивно-технологічні параметри гвинтових змішувачів з умови отримання певної якості змішування

№	Тип гвинтового змішувача	Час виконання процесу, с	Робоча (загальна) довжина шнека, м	Частота обертання шнека, об/хв.	Частота обертання кожуха, об/хв.	Кут нахилу шнека, град.	Зовнішній діаметр шнека, мм
1	Змішувач з обертовим кожухом	92	1,7 (2,2)	250	100	30	96
2	Жорсткий транспортер-змішувач	250	6 (6)	250	-	30	96
3	Змішувач з пересипом	300	2 (2)	250	-	30	96

Джерело: розроблено авторами

Проведено укрупнений економічний підрахунок собівартості виготовлення, експлуатаційних витрат та витрат на технічний огляд і ремонт окремих гвинтових змішувачів за умови досягнення ними однакової якості змішування з використанням даних таблиці 1, результати якого відображено в таблиці 2. При проведенні розрахунків було використано методика, викладену в [26], а також прийнято вартість матеріалів з прайс-листа ПМП «Рост» на 24.01.2025 р.; годинну тарифну ставку для робітника 1-го розряду (01.01.2025 р.) - 48 грн.; тарифні коефіцієнти для робітників: для другого розряду - 1,09, для третього розряду - 1,24, для четвертого розряду - 1,35, для п'ятого розряду - 1,54; вартість електроенергії (01.01.2025 р.) - 2256,66 грн. за 1 МВт-год. без ПДВ (тариф на розподіл електроенергії «Укренерго» для непобутових споживачів в Тернопільській обл.) і 686,23 грн. за 1 МВт-год. без ПДВ (тариф на передачу електроенергії «Укренерго» для непобутових споживачів); термін роботи - 5 років; тривалість роботи на добу – 1 год. (враховуючи те, що гвинтові змішувачі даного типу в основному призначені для малих і середніх сільськогосподарських господарств); кількість робочих днів в році – 251, з них експлуатації – 240 днів.

При проведенні економічного підрахунку собівартості виготовлення враховувались додаткові витрати на виготовлення механізму пригальмовування рухомої частини кожуха та його кріплення (поз. 8 і 11 з рис. 1), а також на

виготовлення механізму пересипу у гвинтовому змішувачі з пересипом.

При розрахунку експлуатаційних витрат приймалось, що при роботі гвинтового змішувача буде залучений один працівник 1-го розряду. Також враховувались додаткові непродуктивні витрати на обертання кожуха у розмірі 10 % [25] від використовуваної потужності електродвигуна (0,16 % використовувана потужність електродвигуна шнека стенда гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом (рис. 2) при швидкості його обертання 250 об/хв. від зазначеної потужності приводу 2,2 кВт [27]), а для жорсткого транспортера-змішувача вони становили 0,52 % від зазначеної потужності приводу 2,2 кВт, за рахунок значної довжини кожуха.

Таблиця 2 – Укрупнені витрати на застосування гвинтових змішувачів з умови досягнення ними однакової якості змішування

№	Тип гвинтового змішувача	Собівартість виготовлення, тис. грн	Річні витрати на експлуатацію (з/п + ел. ен.), тис. грн	Річні витрати на технічний огляд і ремонт, тис. грн
1	Змішувач з обертовим кожухом	25,0	11,79	1,61
2	Жорсткий транспортер-змішувач	29,0	12,27	1,86
3	Змішувач з пересипом	24,0	11,77	1,54

Джерело: розроблено авторами

В табл. 3 наведено укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні наведених типів гвинтових змішувачів. Для визначення продуктивності процесу враховувались результати попередніх досліджень, викладених у працях [1-4, 6, 10, 22]. Так, середня продуктивність гвинтового змішувача з обертовим кожухом і жорсткого транспортера-змішувача становить 3,5 т/год. при зазначених конструктивно-технологічних параметрах (табл. 1), а гвинтового змішувача з пересипом – 0,97 т/год. (з врахуванням часу на розвантаження після кожного циклу).

Таблиця 3 – Укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні гвинтових змішувачів

№	Тип гвинтового змішувача	Витрати на виготовлення, грн	Витрати на експлуатацію, грн	Витрати на технічний огляд і ремонт, грн	Разом витрат, грн
1	Змішувач з обертовим кожухом	5,95	14,04	1,92	21,91
2	Жорсткий транспортер-змішувач	6,91	14,68	2,21	23,8
3	Змішувач з пересипом	19,4	49,04	6,22	74,66

Джерело: розроблено авторами

Можна зробити висновок, що найнижчі витрати на змішування при застосуванні гвинтових змішувачів належать гвинтовому змішувачу з обертовим кожухом.

При виборі гвинтових змішувачів слід враховувати фактори, зазначені вище. У нашому випадку можна скористатись формулою вибору [20], яка включатиме сукупні витрати на змішування 1 тонни суміші при досягненні однакової якості змішування аналізованого і базового представника гвинтового змішувача (у якості базового

представника приймемо гвинтовий жорсткий транспортер-змішувач) та кількості функціональних характеристик аналізованого і базового представника гвинтового змішувача (до них віднесемо дві функціональні характеристики: змішування і переміщення):

$$A_{ГЗ} = \frac{\frac{3B_m}{3B_n} \cdot k_{ваз1} + \frac{N_{нк}}{N_{бн}} \cdot k_{ваз2}}{k_{ваз1} + k_{ваз2}}, \quad (1)$$

де $3B_m$ і $3B_n$ – відповідно загальна вартість базового і аналізованого представника гвинтового змішувача (включає витрати на виготовлення чи купівлю, експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування і ремонт), грн.; $k_{ваз1}$, $k_{ваз2}$ – відповідно ваги показників загальної вартості та кількості функціональних характеристик, які враховують їх важливість і пріоритетність ($k_{ваз} = 0,01 \dots 1$).

Результати розрахунку ефективності наведених типів гвинтових змішувачів (при $k_{ваз1} = 0,75$ і $k_{ваз2} = 0,25$) наступні: гвинтовий змішувач з обертовим кожухом – 1,06; гвинтовий жорсткий транспортер-змішувач (базовий представник) – 1,0; гвинтовий змішувач з пересипом – 0,36.

Аналізуючи вище виконані розрахунки можна зробити наступний висновок, що гвинтовий змішувач з обертовим кожухом є найбільш ефективний і може забезпечувати отримання найнижчої неоднорідності суміші за найнижчих витрат. Витрати на змішування суміші при його застосуванні є в 1,09 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем і в 3,41 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим змішувачем з пересипом.

Висновки.

1. Гвинтові змішувачі з обертовим кожухом є найбільш ефективними засобами з гвинтовими елементами для змішування і можуть забезпечувати отримання найнижчої неоднорідності суміші за найнижчих витрат порівняно з іншими типовими представниками. Витрати на змішування суміші при його застосуванні є в 1,09 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем і в 3,41 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим змішувачем з пересипом. Встановлено, що укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні гвинтовим змішувачем з обертовим кожухом становлять 21,91 грн., гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем – 23,8 грн., а гвинтовим змішувачем з пересипом – 74,66 грн.

2. Для досягнення якості суміші гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем аналогічної, до якості отриманої в результаті її змішування гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом, процес її перелопачування повинен бути мінімум в тричі тривалішим, що відповідно відображається у його габаритних розмірах (робочій довжині зони змішування і переміщення суміші). При використанні шнекових змішувачів з пересипом існують підвищені витрати на експлуатацію, враховуючи значну кількість циклів для перелопачування суміші, а також часто є неможливим переміщення суміші в потрібному напрямку і потреба у додатковому транспортері.

Список літератури

1. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
2. Рогатинський Р., Гевко І., Дячун А., Рогатинська О., Мельничук А. The cargo movement model by the screw conveyor surfaces with the rotating casing. *Вісник ТНТУ*, Тернопіль, 2018. № 4 (92), С. 34-41.
3. Р. Рогатинський, І. Гевко, Л. Рогатинська. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. *Вісник ТНТУ*. 2013. № 1 (69). С. 116–125.

4. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.С., Любачівський Р.О., Грудовий Р.С. Визначення динамічних навантажень у гвинтових змішувачах. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Вип. 40. Луцьк. Ред.-вид. відділ ЛТНУ. 2013. С. 214-220.
5. R.M. Rogatynskyy, Iv.B. Nevko, A.Ye. Dyachun. Research of torsional vibrations of screw in the case of action of impulsive forces. *Scientific Bulletin of the National Mining University.*] - Dnipropetrovsk: NSU, 2015. № 5 (149). P. 64-68.
6. Roman Rogatinskiy, Ivan Nevko, Andriy Dyachun, Olena Skyba, Andrii Melnychuk. 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, P. 140-145.
7. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В. Моделювання роботи малогабаритного лопатево-гвинтового змішувача. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Випуск 6. Луцьк, 2000. С. 129-135.
8. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В., Гудь В.З., Дмитрів О.Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 84-93.
9. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
10. Гудь В. З. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Журнал «Інженерія природокористування»*. Харків, 2020. Випуск № 1(15). С. 66-71.
11. Гудь В.З. Механіко-технологічні основи розробки багатофункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу: дис. докт. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2021. 410 с.
12. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Пік А.І., Марчук Н.М., Маруніч О.П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. *Сільськогосподарські машини*. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 35-44.
13. Дмитрів Д.В., Гевко І.Б., Левенець В.Б. Надійність роботи шнеково-гвинтових змішувачів. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей*, Випуск 16. Луцьк, 2007, с. 62-74.
14. Дмитрів Д. В. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів малогабаритних кормозмішувачів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2001. 179 с.
15. Гурик О. Я. Обґрунтування параметрів транспортерів-змішувачів сипких матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2003. 20 с.
16. Гевко І.Б., Вітровий А.О., Гурик О.Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Випуск 8.- Луцьк, 2001. Ст. 72-82.
17. Гевко І.Б., Гурик О.Я., Левенець В.Б. Дослідження процесу змішування сипких матеріалів // *Науковий вісник Національного аграрного університету*. Вип.60. К.: НАУ, 2003. С. 155 -161.
18. Лещук Р., Гевко І., Комар Р. Результати експериментальних досліджень гвинтових перевантажувальних механізмів. *Вісник ТДТУ*, Тернопіль, 2003, Том 8, № 4 , с.56-61.
19. Маруніч О.П. Обґрунтування параметрів багатофункціонального гвинтового конвеєра для транспортування та змішування сипких матеріалів: дис. ... канд. техн. наук : 133 «Галузеве машинобудування». Тернопіль, 2023. 222 с.
20. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник»*. Кропивницький, 2023. Випуск №8(39) І. С. 85-94.
21. Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. Експериментальна установка гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для змішування сипких матеріалів // *Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»*. Луцьк: ЛТНУ. 2024. Випуск 24. С. 38-44.
22. Дячун А.Є., Гевко І.Б., Золотий Р.З., Коваль С.О., Дериш О.Б., Брикса А.О. Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник»*. Кропивницький, 2024. Випуск №10(41) І. С. 133-143.
23. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом : пат. № 154380 Україна. № u202302288 ; заявл. 15.05.2023р.; опубл. 09.11.2023р., Бюл.№45.
24. Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом : пат. № 154996. Україна. № u202302289 ; заявл. 15.05.2023р.; опубл. 10.01.2024р., Бюл.№2.
25. Ivan Nevko, Andriy Diachun, Olena Dmytriv, Sergii Koval, Pavlo Leskiv, Roman Okhnyvskiy. Research of horizontal screw conveyors-mixers with rotating casing. *Scientific Journal of TNTU*. Tern.: TNTU, 2024. Vol 115. No 3. P. 130–141.
26. Гевко І. Б. Економічне обґрунтування вибору транспортерів для перевантаження сипких вантажів по криволінійних траєкторіях. *Галицький економічний вісник* Тернопіль : ТНТУ, 2014. Том 45. № 2. С. 10-16.

27. І. Гевко, А. Дячун, О. Скиба, А. Мельничук, Р. Золотий, І. Шуст Техніко-економічне обґрунтування підвищення продуктивності транспортно-технологічних процесів за допомогою гвинтових конвеєрів з обертовими кожухами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. «Технічні науки». «Механізація сільськогосподарського виробництва». 2018. Вип. 190, С. 318–326.

References

1. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. I. (2014). Naukovo-prikladni osnovi stvorennya gvintovykh transportno-tehnologichnykh mekhanizmiv [Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms]. Ternopil: TNTU imeni Ivana Pulyuya. [in Ukrainian.]
2. Rogatynskiy, R., Hevko, I., Diachun, A., Rogatynska, O., & Melnychuk, A. (2018). The cargo movement model by the screw conveyor surfaces with the rotating casing. *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, (4), 34-41. [in Ukrainian]
3. Rohatynskiy, R., Hevko, I., & Rohatynska, L. (2013). Optymizatsiia parametriv hvyntovykh transportnotekhnologichnykh system [Optimization of the parameters of screw transport and technological systems]. *Visnyk TNTU*, 1(69), 123-230. [in Ukrainian]
4. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Liubachivskiy, R. O., & Hrudoviy, R. S. (2013). Vyznachennia dynamichnykh navantazhen u hvyntovykh zmishuvachakh. *Naukovi notatky*, (40), 214-220. [in Ukrainian].
5. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. Ye. (2015). The research of the torsional vibrations of the screw in terms of impulsive forces. *Naukovyi visnyk NHU*, (5 (149)), 64-68.
6. Rohatynskiy, 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*, 22(4), 140-145.
7. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Dmytriv, D. V. (2000). Modeliuvannia roboty malohabarytnoho lopatevohvyntovoho zmishuvacha. *Silskohospodarski mashyny: zb. nauk. statei*. Lutsk, 129-135. [in Ukrainian].
8. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Dmytriv, D. V., Hud, V. Z., & Dmytriv, O. R. (2020). Modeliuvannia zmishuvannia komponentiv hvyntovymy konveieramy-zmishuvachamy. *Silskohospodarski mashyny: zb. nauk. statei*, (45), 84-93. [in Ukrainian].
9. Rohatynskiy R. M. Prospective screw conveyors: designs, calculation, research / R. Rohatynskiy. M., Gevko I. B., Lyashuk O. L., Gud V. Z., Dyachun A. E., Melnychuk A. L., & Slobodian L. M. Ternopil: FOP Palyanytsia V. A., 2019. 212 p. [in Ukrainian]
10. Hud, V. Z. (2020). Syntez zmishuvachiv z hvyntovymy robochymy orhanamy. *Naukovyi zhurnal «Inzheneriia pryrodokorystuvannia»*, (1 (15)), 66-71. [in Ukrainian]
11. Hud, V. Z. (2021). Mekhaniko-tehnologichni osnovy rozrobky bahatofunktsionalnykh sektsiinykh shnekiv dlia zernovoho materialu. [in Ukrainian].
12. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Pik, A. I., Marchuk, N. M., & Marunych, O. P. (2020). Syntez hvyntovykh transporteriv-zmishuvachiv. *Silskohospodarski mashyny*, (45), 34-44. [in Ukrainian]
13. Dmytriv, D. V., Hevko, I. B., & Levenets, V. B. (2007). Nadiinist roboty shnekovo-hvyntovykh zmishuvachi. [in Ukrainian].
14. Dmytriv, D. V. (2001). Rozrobka konstruksii ta obgruntuvannia parametriv malohabarytnykh kormozmishuvachiv (Doctoral dissertation, stupenia kand. tekhn. nauk./DV Dmytriv.–Ternopil, 2001.–20 s). [in Ukrainian].
15. Huryk, O. Ya. (2003). Obgruntuvannia parametriv transporteriv-zmishuvachiv sypkykh materialiv. Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk. Ternopil. [in Ukrainian].
16. Hevko, I. B., Vitrovyi, A. O., & Huryk, O. Ya. (2001). Dynamichna model protsesu transportuvannia sypkykh materialiv hvyntovym konveierom. *Silskohospodarski mashyny. Zbirnyk naukovykh statei*. 2001. Vyp. 8, 72-82. [in Ukrainian].
17. Hevko, I. B., Huryk, O. Ya., & Levenets, V. B. (2003). Doslidzhennia protsesu zmishuvannia sypkykh materialiv. [in Ukrainian].
18. Leshchuk, R., Hevko, I., & Komar, R. (2003). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen hvyntovykh perevantazhuvalnykh mekhanizmiv. *Visnyk TDTU*, 8(4), 56-61. [in Ukrainian].
19. Marunych, O.P. (2023). Justification of the parameters of the multifunctional screw conveyor for transporting and mixing loose materials: diss. ... candidate technical Sciences: 133 "Industrial mechanical engineering". Ternopil, 222 p. [in Ukrainian].
20. Koval, S.O. (2023). Synthesis of screw conveyors-mixers with a rotating casing. *Collection of scientific papers "Central Ukrainian scientific bulletin"*. Kropyvnytskyi. Issue #8(39) I. WITH. 85-94. [in Ukrainian]
21. Diachun, A. Ye., Dmytriv, O. R., Hevko, B. R., Koval, S. O., & Tsapyk, R. P. (2024). Eksperymentalna avtomatyzovana ustanovka hvyntovoho konveiera z obertovym kozhukhom dlia zmishuvannia sypkykh materialiv. *Perspektyvni tekhnologii ta pryklady*, 1(24), 38-44. [in Ukrainian].

22. Dyachun A.E., Gevko I.B., Zoloty R.Z., Koval C.O., Derysh O.B., & Briksa A.O. (2024). Results of experimental studies of the quality of mixing of loose materials by an automated installation of a screw conveyor with a rotating casing. *Collection of scientific papers "Central Ukrainian scientific bulletin"*. Kropyvnytskyi, Issue #10(41) I. WITH. 133-143. [in Ukrainian].
23. Utility model patent No. 154380. Ukraine, IPC 65G 33/08 (2006.01). Screw conveyor-mixer with a rotating casing / Iv.B. Gevko, S.O. Koval, A.E. Dyachun, B.R. Gevko, T.A. Dovbush, A.D. Dovbush, I.G. Tkachenko, Radik D.L., Stibailo O.Yu., Briksa A.O. (Ukraine). No. u202302288. Application 05/15/2023; Publ. 09.11.2023, Bull. No. 45. [in Ukrainian].
24. Utility model patent No. 154996. Ukraine, IPC 65G 33/08 (2006.01). Stand for studying the characteristics of a screw conveyor-mixer with a rotating casing / Iv.B. Gevko, S.O. Koval, A.E. Dyachun, B.R. Gevko, T.A. Dovbush, A.D. Dovbush, Dmytriv O. R., Sokil M.B., Briksa A.O. (Ukraine). No. u202302289. Application 05/15/2023; Publ. 10.01.2024, Bull. No. 2 [in Ukrainian].
25. Gevko, I., Diachun, A., Dmytriv, O., Koval, S., Leskiv, P., & Okhnyvskyi, R. (2024). Research of horizontal screw conveyors-mixers with rotating casing. *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 115(3), 130-141.
26. Gevko, I. (2014). Ekonomichne obgruntuvannya vyboru transporteriv dlia perevantazhennia sypkykh vantazhiv po kryvoliniinykh traiektoriiah [in Ukrainian].
27. Gevko, I. B., Diachun, A. Ye., Melnychuk, A. L., Zoloty, R. Z., & Shust, I. M. (2018). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya pidvyshchennia produktyvnosti transportno-tekhnolohichnykh protsesiv za dopomohoiu hvyntovykh konveieriv z obertovymy kozhukhamy [in Ukrainian].

Ivan Gevko, Prof., DSc., **Andrii Gupka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhiy Koval**, **Andriy Briksa**, **Volodymyr Buchynsky**

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Technical and Economic Substantiation of the Effectiveness of the Use Of Screw Mixers

Screw transport and technological mechanisms have gained the greatest use as conveyors and mixers of materials. This combination of processes allows for the use of one mechanism instead of two. However, the intensity of mixing in such tools is not always high. Therefore, often, in order to obtain the required quality, a significant number of shoveling of the mixture is required, which requires either an increase in the length of the technical means, or ensuring the cyclical operation of it. Therefore, the purpose of the work is to carry out a technical and economic substantiation of the feasibility of using screw conveyors-mixers with rotating casings.

An important task of their research was to find ways to ensure the quality of mixing of loose components due to the development and modernization of original designs of screw conveyors-mixers. In order to ensure significant productivity of the transport and technological process of transportation and the quality of mixing of loose materials, the design of a screw conveyor-mixer with a rotating casing was developed, patented and researched. In the existing designs of screw mixers, high quality mixing can be obtained either due to a significant length of mixing, or due to the cyclic mode of operation, which does not ensure the movement of materials. The developed design of the screw conveyor-mixer with a rotating casing allows for a short length of movement of the mixture, due to the necessary friction of the auger with the material and casing, to perform the required number of shoveling and ensure high quality of mixing.

In the article, calculations were made and the following conclusions were drawn:

1. Screw mixers with a rotating casing are the most cost-effective means with screw elements for mixing and can provide the lowest mixture heterogeneity at the lowest costs compared to other typical representatives. The cost of mixing 1 ton of mixture when it is used is 1.09 times lower than when it is mixed with a screw conveyor-mixer and 3.41 times lower than when it is mixed with a screw mixer with overflow. It was established that the aggregated costs of mixing 1 ton of the mixture when using a screw mixer with a rotating casing are UAH 21.91, a screw rigid conveyor-mixer is UAH 23.8, and a screw mixer with overflow is UAH 74.66.

2. Achieving the quality of the mixture with a screw rigid conveyor-mixer similar to the quality obtained as a result of its mixing with a screw conveyor-mixer with a rotating casing, the process of shoveling it should be at least three times longer, which is accordingly reflected in its overall dimensions (the working length of the mixing zone and movement of the mixture). When using screw mixers with overflow, there are increased costs of electricity, given the significant number of cycles for shoveling the mixture, and it is often impossible to move the mixture in the desired direction and the need for an additional conveyor.

screw conveyor-mixer, rotary casing, performance, mixture heterogeneity, feasibility study

Одержано (Received) 20.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

П. М. Луц¹, канд. техн. наук, І. А. Бабин², доц., канд. техн. наук,
В. Б. Говоруха², проф., д-р фіз.-мат. наук, В. М. Павліченко³, с.н.с., канд. біол. наук
¹Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна
²Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
³Відділ біоекотехнічних систем у тваринництві ННЦ «ІМЕСГ», м. Запоріжжя, Україна
e-mail: lutspt@gmail.com, ihorbabyn@gmail.com, govorukhavb@yahoo.com, valpavlich@gmail.com

Результати експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора кормів білково-вітамінного концентрату рослинного походження

У статті представлені результати досліджень технології виробництва білково-вітамінної кормової добавки на основі рослинної сировини. Представлені результати досліджень експлуатаційних характеристик диспергатора кормів, призначеного для виробництва кормових добавок у вигляді білково-вітамінного концентрату рослинного походження. Проаналізовано основні фактори, що впливають на ефективність процесу диспергації, зокрема фізико-хімічні властивості сировини та режими роботи обладнання. Запропонована можливість використання в якості компонентів кормової добавки з трьох складових: зеленої маси кормових трав, пивної дробини (приклад залучення вторинної сировини переробної галузі) та зернової складової. Запропоновані технологічні рішення для забезпечують стабільність процесу та збереження поживних властивостей складових. Удосконалена технологія забезпечує гомогенізацію, активацію поживних речовин і пастеризацію продукту, що сприяє покращенню якості кормів, економічній ефективності та екологічній безпеці виробництва.

білково-вітамінний концентрат, зелена маса, пивна дробина, кормозабезпечення, диспергатор, кормова добавка, кавітаційна обробка.

Постановка проблеми. Сучасне тваринництво вимагає раціонального підходу до виробництва кормів з метою підвищення їх поживності, засвоюваності та економічної ефективності. Одним із ключових викликів є створення енергоощадних технологій виробництва кормових добавок, які забезпечують тварин усіма необхідними поживними речовинами у легкозасвоюваних формах.

Існуючі технології виробництва кормів, засновані на переробці рослинної сировини, часто мають низьку ефективність через недостатнє використання біологічного потенціалу складових компонентів, значні витрати енергії та матеріальних ресурсів, а також труднощі у забезпеченні стабільності фізико-хімічних властивостей кінцевого продукту. На рис. 1 наведено схему впливу технологічності кормозабезпечення на органічність кормів.

Крім того, проблема утилізації вторинних ресурсів сільськогосподарських переробних галузей, таких як пивна дробина, спиртова барда та жом, залишається актуальною через їх обмежену можливість використання у годівлі тварин. Використання таких компонентів у поєднанні із зеленою масою та зерновими культурами вимагає впровадження технологій, які дозволяють досягти оптимальної дисперсності, однорідності та збереження поживних властивостей. Це вимагає удосконалення техніко-технологічних моделей методів диспергаційної й кавітаційної обробки, та забезпечення високого рівня ефективності виробництва кормових добавок.

Мета дослідження. Дослідити публікації щодо впливу розглянутої технології кормозабезпечення на органічність кормів для тварин, проаналізувати та порівняти

експериментальні данні розроблених техніко-технологічних моделей енергоощадних виробництв кормової добавки на основі білкових, вуглеводних та вітамінних комплексів.



Рисунок 1 – Схема впливу технологічності кормозабезпечення на органічність кормів
Джерело: розроблено авторами

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день найефективнішими вважаються технології виробництва кормових добавок, що створюють умови для надходження в організм тварин речовин у легкозасвоюваній формі низькомолекулярних сполук, які безпосередньо всмоктуються в шлунково-кишковому тракті. Це підвищує доступність і засвоюваність поживних речовин, зменшує витрати енергії тварин на їх засвоєння та знижує навантаження на ферментативну активність мікрофлори кишечника. І в той же час зменшуються потреби в кормах, а відповідно й об'єм відходів до 40%. [1, 2]. Такого результату можливо досягти нескладними методами підготовки кормової сировини, що базується на сучасному способі диспергаційно-кавітаційної обробки кормів, який набув достатньо широкого розповсюдження. В основу удосконалення техніко-технологічної моделі енергоощадного виробництва кормової добавки на основі рослинної сировини покладено обґрунтовану ідею створення 3-х компонентної (на першому етапі) білково-вітамінної добавки шляхом диспергації, змішування та кавітації на експериментальній установці, що реалізує згадані ефекти [3, 4].

За результатами виконаного аналізу сучасного обладнання, що застосовується при приготуванні рідких кормових сумішей та добавок для тваринництва [5, 6] особливу увагу привертають моделі представлені в таблиці 1.

Розглянувши складові кормової добавки основними виділимо зелену масу трав. Маса кормових і лікарських рослин використовується, як головний постачальник протеїнів в кормах, а також природного комплексу вітамінів і біологічно активних речовин. Пивна дробина – білково-вітамінно насичена вторинна сировина, яка традиційно використовується в годівлі сільськогосподарських тварин. Цільне зерно - основа більшості раціонів для тварин, головне джерело енергетичного забезпечення тварин через високий вміст перетравлюваних вуглеводів. Враховуючи аналіз ефективності процесів диспергації та кавітації, фізико-хімічні властивості сировини та можливість поєднання трьох видів сировини для створення збалансованої білково-вітамінної кормової добавки [7].

Розроблена технологічна модель (рис. 2) енергоощадного виробництва кормової добавки на модульній установці з продуктивністю 100 кг. Створена модель враховує всі

переваги сировини та обладнання для здійснення технологічного процесу й ґрунтується на таких принципах:

- залучення білково-вітамінної добавки, як доступної сировини з одночасним виведенням з виробництв вторинних сировинних складових (на прикладі пивної дробини);
- кормові трави у вигляді зеленої маси слугують джерелом природного білка, вітамінів (зокрема каротину) й комплексів активних речовин;
- зерно, як джерело високого вмісту вуглеводів, постачає корми енергетичними компонентами, які надходять до організму тварин;
- диспергаційно-кавітаційна обробка суміші часток зеленої маси, зерна та пивної дробини до дрібнодисперсної гомогенної форми сприяє поліпшенню смакових якостей, покращенню перетравності складових компонентів та пастеризації суміші.

Таблиця 1 – Устаткування для кавітаційної обробки кормів і кормових сумішей

Виробник / розробник	Тип обладнання	Вихідна сировина	Загальний вигляд	Характеристика
ТОВ "Завод УкрМашПром" (Україна)	Диспергатор КГІТТ-02	Зерно, грубі корми, суміші, зелена маса трав, відходи переробної промисловості		Продуктивність – 6 м³/год, Потужність – 11 кВт
Науково-виробничий упроваджувальний центр АІНУ (Україна)	АКГСМ Кормоагрегати серії «Мрія» Відцентровий дисковий подрібнювач АКГСМ-04	зерно, зерноsumіші, зерноsumіші, зелена маса трав, відходи переробної промисловості		Продуктивність готової суміші – 100 кг/год, Потужність – 2,2 кВт.
STS Group (Україна)	Гомогенізатор виносний (проточний)	Для створення стійких однорідних продуктів на виробництві		Об'ємна продуктивність від 10 куб.м./год., Потужність – 12 кВт. Температура до 100 град.
Компанія IKR Group (Україна)	Насос диспергатор - гомогенізатор для однорідних мас НД 5, НД 10;	приготування кормів для тварин -відновлення сумішей для заміни молока; виробництво кормів із грубих харчових відходів		Продуктивність: НД-5 - 5 м³/ год; НД-10 - 10м³/ год; Встановлена потужність: НД 5 - 5,5кВт; НД 10 - 7,5кВт;

Джерело: розроблено авторами згідно даних [1-6]

Компонування суміші у складі часток зеленої маси, зерна та пивної дробини дозволяє одержати продукцію у вигляді готового корму або кормової добавки з високим вмістом ферментованих, біологічно активованих (переважно мономірних) сполук білка, вуглеводів, жирів, комплексу взаємодоповнюючих вітамінів і біологічно активних речовин. Екологічно чиста, пастеризована кормова добавка є натуральною, без небажаних змін структурних елементів поживних речовин і в той же час підвищеної поживності і засвоюваності.

Постановка завдання. Основуючись проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій, визначено основні напрями вдосконалення технологій виробництва

кормових добавок. Показано, що найбільш ефективними є підходи, які спрямовані на створення умов для забезпечення тварин низькомолекулярними поживними сполуками. Це дозволяє покращити засвоюваність речовин, знизити енергетичні витрати тварин на асиміляцію та зменшити ферментативне навантаження.



Рисунок 2 – Технологічна модель виробництва кормової добавки

Джерело: розроблено авторами

Завданнями можуть слугувати:

- аналіз оптимальних режимів роботи диспергатора для забезпечення стабільності процесу та збереження поживних властивостей компонентів кормової добавки;
- дослідження експлуатаційних характеристик кавітаційного диспергатора кормів, призначеного для виробництва кормових добавок з білково-вітамінного концентрату рослинного походження;
- оцінка можливостей комбінування основних компонентів (зеленої маси кормових трав, пивної дробини, зерна злакових культур) для створення збалансованої кормової добавки.

Виклад основного матеріалу. З метою впровадження енергоощадної технології розроблено та запропоновано техніко-технологічну модель виробництва білково-вуглеводно-вітамінної кормової добавки на основі трьох основних компонентів: зеленої маси кормових трав, пивної дробини та зерна злакових культур (рис. 2). Вибір цих компонентів зумовлений їх доступністю, високою поживною цінністю та можливістю нескладного та ефективного перетворення. Особливу увагу пропоновано приділити застосуванню диспергаційно-кавітаційного впливу, який дозволяє досягти високої ступені гомогенізації та активації складових поживних речовин [8]. Такий метод забезпечує: пастеризацію суміші; покращення смакових якостей та перетравності; тривалий термін зберігання при використанні нескладних методів консервування утвореної суміші. Модель враховує оптимальні параметри технологічного процесу для отримання високоякісної кормової добавки, яка також є екологічно безпечною та економічно вигідною.

Пивна дробина в її складі, як продукт попередньої ферментації в процесі одержання солоду в пивоварінні, не має в своєму вмісті крохмалю та цукру, вичерпаних попередньою переробкою, але за рахунок перерозподілу біохімічних компонентів, має доволі високий вміст протеїну і білка, а також є суттєвим джерелом вітамінів групи В, які необхідні тваринам для покращення обміну речовинами.

На основі технологічної моделі проведено експериментальні дослідження лінії енергоощадного виробництва кормової добавки орієнтовану на продуктивність 100 кг за виробничий цикл (рис. 3). Експериментальна лінія має у складі ділянку підготовки

вихідної сировини, зону кавітаційно-диспергаційної обробки кормів, блок консервування сировини та ділянку зберігання продукції.

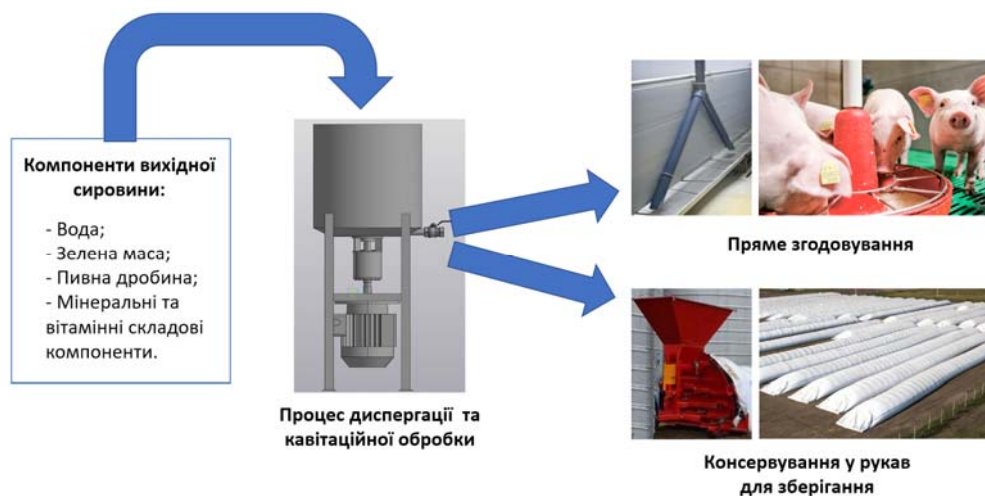


Рисунок 3 – Технологічна схема експериментальної лінії виробництва кормової добавки
Джерело: розроблено авторами

Основоутворюючим засобом для ферментативної обробки кормових матеріалів і їх сумішей є кавітаційний диспергатор кормів (рис. 4).



Рисунок 4 – Роторно-кавітаційний диспергатор:
а) загальний вигляд; б) конструкційне розміщення ротор-статор

Джерело: розроблено авторами

Роторно-кавітаційний диспергатор (рис. 4, а) складається із робочих органів (рис. 4, б) – статора та ротора. В статорі та роторі виконано отвори, які послідовно співпадають за віссю розташування. Статор має кількість отворів більшу ніж ротор. Технологічний процес виконується кормосумішу при її переміщенні за рахунок відцентрових сил розганяючись у отворах ротора. В момент перекриття кільцем статора відповідного отвору, швидкість руху потоку миттєво зменшується. Раптове підвищення тиску викликає гідравлічний удар, зусилля стискання через рідину передається на тверді частки суміші. В момент сполучення отворів ротора і статора тверді частки потрапляючи до зони від'ємного тиску піддаються впливу зусилля розриву. Цей перепад тиску й утворює зону кавітаційних імпульсів в робочій камері. Під дією бульбашок рідини, що схлопують, кормові частки отримують додаткове руйнування від знакомінних навантажень. Таким чином проходження кормосуміші через роторний диспергатор супроводжується її подрібненням. Велика сумарна площа поверхні впливу кавітаційних бульбашок забезпечує інтенсивність процесу, що завжди присутні у

рідині. Крім основного руйнуючого впливу кавітація призводить до підвищення температури рідини.

Технічна характеристика удосконаленого роторно-кавітаційного насоса-диспергатора наведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічна характеристика роторно-кавітаційного насоса-диспергатора

Характеристика	Одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність	кг/год	до 100
Встановлена потужність	кВт	до 7
Маса устаткування	кг	до 170
Обслуговуючий персонал	-	2
Питома енергоємність	кВт · год/кг	не більше 0,07
Питома матеріаломісткість	кг · год/кг	не більше 1,75

Джерело: розроблено авторами

Для виконання експериментальних досліджень кавітаційним диспергатором кормів білково-вітамінного концентрату розроблено та змонтовано стенд (рис. 5) із спеціальним обладнанням та вимірювальними приладами. До складу експериментальні лінії енергоощадного виробництва кормової добавки запропонованої установки входить: бункер приготування кормової суміші; система трубопроводів для подачі і відведення переробленої сировини; відцентровий роторний кавітаційний насос; система керування та контролю та прилади вимірювання основних експлуатаційних характеристик. Експериментальна частина досліджень процесу диспергації та кавітаційної обробки рослинної сировини проводилась на випробувальній базі Інституту механізації тваринництва [9].

Послідовність виконання експерименту виглядає наступним чином. Після завантаження в бункер, компоненти кормосуміші (вода, зелена маса, пивна дробина, зернова складова) певний час проходять обробку в роторно-кавітаційному диспергаторі за замкненим циклом.

Пропускна здатність роторно-кавітаційного диспергатора визначено через об'єм перекачаної маси. Зміну температури за часом у процесі її диспергації вимірювали датчиком температури кожні 10 хв. на протязі проходження експерименту. Характеристики вихідної сировини та кінцевого продукту за результатами диспергації кормосуміші в табл. 3.



а)



б)

а – попереднє подрібнення зеленої маси; б – підготовка та зважування вихідної сировини

Рисунок 5 – Загальний вигляд експериментального випробувального стенду

Джерело: розроблено авторами

За результатами експериментальних досліджень складено графік потужності, яка витрачається для роботи роторно-кавітаційного диспергатора та графік температури суміші за час диспергації (рис. 6).

Встановлено, що потужність роторно-кавітаційного диспергатора в значній мірі залежить від часу диспергації і стану подрібнення (дисперсності) суміші. Спостерігається початкове збільшення потужності диспергатора (рис. 6) а після 24 хв. поступово зменшується і стабілізується на 2800 Вт після 90 хв. роботи.

Таблиця 3 – Характеристики вихідної сировини та кінцевого продукту за результатами диспергації кормосуміші

Показники		Значення
Початкові умови та характеристики процесу	Тривалість диспергації, хв.	60
	Максимальний розмір частки на початку диспергації, мм	до 7
	Співвідношення рідини до вихідної сировини:	4 : 1
	- вода	1
	- зелена маса	1
	- пивна дробина	1
	- зернова складова	1
	Підвищення температури гідросуміші в процесі диспергації, °C	до 65
Готова продукція	Розмір часток на виході з диспергатора, мкм	до 60
	Вологість, %	90-94
	Показник рН суміші	4,8-5,2

Джерело: складена авторами

Підвищена потужність диспергатора в початковий момент пояснюється присутністю великої кількості неподібнених часток (зерно, пивна дробина та інші). Зростає й температура кормосуміші в процесі диспергації за рахунок присутності явища кавітації.

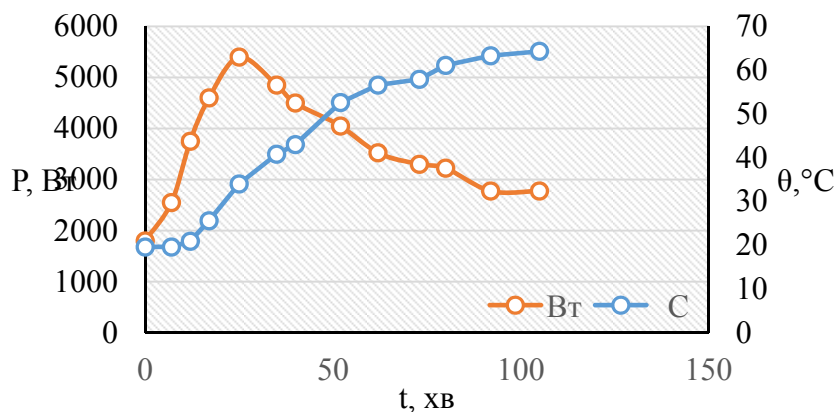


Рисунок 6 – Зміна потужності роторно-кавітаційного диспергатора та температури суміші від тривалості диспергації

Джерело: складено авторами

В ході досліджень визначався фракційний склад сумішей, ступінь перерозподілу фракцій, а також вплив часу обробки і температури на зміну основних якісних показників (гранулометричний склад та дисперсність суміші). Дані фракційного складу компонентів подрібнених та диспергованих часток суміші представлено в табл. 4.

Таким чином, попередні дослідження свідчать про наявність в досліджуваній суміші явищ деструкції і ферментації основних складових поживної цінності кормів – білків, жирів, вуглеводів, клітковини.

Таблиця 4 – Якісні показники процесу подрібнення компонентів суміші за допомогою експериментального роторного кавітаційного диспергатора

Варіанти	Температура, °C	Відсоткова доля часток матеріалу відповідного розміру, мм						
		5	3	2	1	0,5	0,25	<0,25
Вихідна зелена маса після попереднього подрібнення		16,8	23,14	19,25	16,68	1,05	0,77	22,31
Диспергована зелена маса протягом 30 хв.	66,0	-	22,86	14,06	15,91	2,51	1,83	42,83
Диспергована зелена маса протягом години	71,6	-	17,54	11,97	20,1	2,31	2,23	45,85
Пивна дробина		10,23	50,66	26,01	13,1	-	-	-
Диспергована суміш 1: ЗМ + ПД	62,8	-	17,13	18,76	20,74	7,78	4,69	30,9
Диспергована суміш 2: ЗМ + ячмінь	63,6	-	9,93	16,49	21,19	8,45	2,71	41,23

Джерело: складена авторами

Висока вологість отриманої кормової добавки робить процес зберігання проблемним: висушування або зневоднення потребує значних витрат енергії. Пріоритетним напрямком використання запропоновано пряме згодовування тваринам на фурах. Для знаходження оптимальних якісних умов консервування отриманої сировини необхідні додаткові дослідження щодо виявлення параметрів технічного процесу та засобів, які б забезпечили максимальний ефект при високій збереженості поживних речовин, тобто забезпечували виробництво кормового концентрату довгострокового зберігання.

Висновки. Ефективність досліджень полягає у створенні умов для забезпечення тварин легко засвоюваними низькомолекулярними сполуками, які покращують перетравність та знижують енерговитрати тварин на асиміляцію кормів. Удосконалена технологія виробництва білкової вітамінної кормової добавки дозволяє ефективно використовувати різні компоненти сільськогосподарської сировини завдяки застосуванню диспергаційно-кавітаційної впливу.

Експериментальні дослідження підтвердили відповідність розробленої моделі технологічним і економічним вимогам, забезпечивши стабільність якості та високі експлуатаційні характеристики кінцевого продукту.

Впровадження застосування розробленої технології сприяє зниженню витрат на виробництво кормових добавок, оптимізації використання вторинної сировини, що зменшує обсяги відходів і негативний вплив на довкілля.

Список літератури

- Алієв Е. Б., Алієва О. Ю., Малегін Р. Д., Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва. *Наукові горизонти*. 2020, № 07 (92), С. 112-119.
- Уминський С., Дударев І., Осадчук П., Чучуй В., Житков С. Гідродинамічне обладнання для технологічних процесів виготовлення рідких кормів. *Науково-виробничий журнал "Техніка і технології АПК"*. 2020. № 1(114) С.7-9.
- Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Яропуда В. М., Малегін Р. Д., Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 2 (109). С. 5-15.
- Алієв Е. Б., Луц П. М., Верета В. В., Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми роторно-кавітаційного диспергатора кормосумішей. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України. Збірник наукових праць*. Ніжин, 2019. Вип. 12. С. 17–25.
- Павліченко В. М., Лиходід В. В., Шапаренко Л. Г., Луц П. М., Забудченко В. М., Ковальов І. І., Результати техніко-технологічного контролю за якістю обробки компонентів вологих кормових сумішей на роторно-кавітаційному диспергаторі РоКаДи-2. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2014. Вип. 2. С. 101–114.
- Павліченко В. М., Лиходід В. В., Луц П. М., Ковальов І. І., Забудченко В. М., Результати дослідження процесу кавітаційної обробки вологих багатокомпонентних кормових сумішей. *Вісник Харківського*

національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Технічні науки. 2014. Вип. 144. С. 250–257.

7. Сергієва Н. М. Якісні грубі корми-шлях до високих надоїв молока. *Техніка і технології АПК. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2013. № 6 (45). С.18-19.
8. Шевченко І. А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М., Аналіз конструкцій технічних засобів виробництва вологих високозасвоєваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.техн. зб.* 2013. Вип. 43. ч. I. С. 179–185.
9. Павліченко В. М., Троїцька О. О., Лиходід В. В. Обґрунтування техніко-технологічних основ енергоощадного виробництва кормової добавки на основі рослинної сировини. *Механізація, екологізація та конвертація біосировини в тваринництві*. 2012. Вип. 1 (9). С. 10–21.

References

1. Aliyev, E. B., Aliyeva, O. Yu., & Malyegin, R. D. (2020). Tehniko-tehnologichne zabezpechennya kompleksnoyi bezvidhodnoyi pererobki roslinnoyi sirovini olijnih kultur u kormi dlya organichnogo tvarinnictva. *Naukovi gorizonti*, (7), 112–119. [in Ukrainian].
2. Uminkij, S., Dudarev, I., Osadchuk, P., Chuchuj, V., & Zhitkov, S. (2020). Hidrodinamichne obladnannya dlya tehnologichnih procesiv vigotovlennya ridkih kormiv. *Tehnika i tehnologiyi APK*, (1), 7–9 [in Ukrainian].
3. Aliyev, E. B., Mikolenko, S. Yu., Yaropuda, V. M., & Malyegin, R. D. (2020). Obgruntuvannya konstruktivno-tehnologichnoyi shemi kavitacijnogo dispergatora-gomogenizatora silskogospodarskoyi sirovini roslinnoho pohodzhennya na kormovi cili. *Tehnika, energetika, transport APK*, (2), 5–15 [in Ukrainian].
4. Aliyev, E. B., Luc, P. M., & Vereta, V. V. (2019). Obgruntuvannya konstruktivno-tehnologichnoyi shemi rotorno-kavitacijnogo dispergatora kormosumishej. *Suchasni problemi ta tehnologiyi agrarnogo sektoru Ukrayini*, (12), 17–25 [in Ukrainian].
5. Pavlichenko, V. M., Lihodid, V. V., Shaparenko, L. G., Luc, P. M., Zabudchenko, V. M., & Kovalov, I. I. (2014). Rezultati tehaniko-tehnologichnogo kontrolyu za yakistyu obrobki komponentiv vologih kormovih sumishej na rotorno-kavitacijnomu dispergatori RoKaDi-2. *Visnik Ukrayinskogo viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi agrarnoyi osviti*, (2), 101–114 [in Ukrainian].
6. Pavlichenko, V. M., Lihodid, V. V., Luc, P. M., Kovalov, I. I., & Zabudchenko, V. M. (2014). Rezultati doslidzhennya procesu kavitacijnoyi obrobki vologih bagatokomponentnih kormovih sumishej. *Visnik Harkivskogo nacionalnogo tehnichnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka: Tehnichni nauki*, (144), 250–257 [in Ukrainian].
7. Serhiyeva, N. M. (2013). Yakisni grubi kormi-shlyah do visokih nadoyiv moloaka. *Tehnika i tehnologiyi APK*, (6), 18–19 [in Ukrainian].
8. Shevchenko, I. A., Pavlichenko, V. M., Lihodid, V. V., & Zabudchenko, V. M. (2013). Analiz konstrukcij tehnichnih zasobiv virobnictva vologih visokozasvoyuvanih kormiv. *Konstruyuvannya, virobnictvo ta ekspluatatsiya silskogospodarskih mashin*, 43(1), 179–185 [in Ukrainian].
9. Pavlichenko, V. M., Troiytska, O. O., & Lihodid, V. V. (2012). Obgruntuvannya tehniko-tehnologichnih osnov energooshadnogo virobnictva kormovoyi dobavki na osnovi roslinnoyi sirovini. In *Mehanizatsiya, ekologizatsiya ta konvertatsiya biosirovini v tvarinnictvi* (Vol. 1(9), pp. 10–21). In-t meh. tvarinnictva NAAN [in Ukrainian].

Pavlo Luts¹, PhD tech. sci., **Ihor Babyn**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Govorukha**², Prof., DSc., **Valentyna Pavlichenko**³, Senior Research Associate, PhD biolog. sci.

¹Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

²Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

³Systems in Animal Husbandry National Scientific Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", Zaporizhzhia, Ukraine

Results of Experimental Studies of a Cavitation Disperser of Protein-Vitamin Concentrate Feeds of Plant Origin

The article presents the results of research into the technology of production of protein-vitamin feed additive based on plant raw materials. The results of research into the operational characteristics of a feed disperser designed for the production of feed additives in the form of protein-vitamin concentrate of plant origin are presented. The main factors affecting the efficiency of the dispersion process are analyzed, in particular the physicochemical properties of the raw material and the operating modes of the equipment. The possibility of using three components as components of a feed additive is proposed: green mass of fodder grasses, beer grains (an example of involving secondary raw materials from the processing industry) and a grain component. Technological solutions are proposed to ensure the stability of the process and the preservation of the nutritional properties of the components. The improved technology provides homogenization, activation of nutrients and pasteurization of the product, which contributes to improving the quality of feed, economic efficiency and environmental safety of production.

protein and vitamin concentrate, green mass, beer grains, feed supply, dispersant, feed additive, cavitation treatment

Одержано (Received) 05.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

М. С. Магопець, В. В. Аулін, проф., д-р. техн. наук, **А. В. Гриньків**, ст. дослід., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: magmish@ukr.net, AulinVV@gmail.com

Вплив елементів ергономіки та мехатроніки на функціонування системи «оператор – мобільна машина»

Стаття присвячена основним аспектам ергономіки робочих місць водіїв транспортних засобів та операторів сільськогосподарської техніки. Обґрунтовано важливість ергономічного підходу на етапі проектування і експлуатації мобільних машин для забезпечення комфорту, безпеки, ефективності праці оператора та надійності системи «оператор – мобільна машина». Проаналізовано фактори, що впливають на ергономічність робочого простору оператора, наведено їх порівняльні характеристики з урахуванням специфіки їх експлуатації.

Особлива увага приділяється впливу ергономіки на експлуатаційну надійність мобільних машин, а також зниженню ймовірності помилок через втому оператора. Описано сучасні мехатронні системи керування, що сприяють автоматизації робочих технологічних процесів і підвищенню точності управління машинами. Зроблено висновок про те, що ергономіка і мехатроніка є ключовими факторами забезпечення безпеки, ефективності та безвідмовної роботи мобільних машин.

система «оператор – мобільна машина», ергономіка, мехатронні системи, ергономічні показники, ефективність, надійність

Постановка проблеми: Підвищення надійності і ефективності мобільних машин можливо реалізувати на практиці забезпеченням комфорту та безпеки роботи їх оператора. Незважаючи на значний прогрес у розвитку техніки, багато моделей системи «оператор – мобільна машина» мають недосконалі ергономічні характеристики. Це призводить до підвищення втомлюваності операторів, зниження продуктивності праці та збільшення ризику аварійних ситуацій та виходу з ладу мобільних машин, що визначає актуальність проведення наукових досліджень в цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження питань, що стосуються ергономічних показників та їх впливу на оператора та машину на сьогодні ще не знайшли належного висвітлення у науковій літературі. Окремі ергономічні показники досліджувались в роботі Анірбана Чоудхура та Чайтанья Качаре на прикладі автомобіля Shelby Cobra, однак дослідження стосувалось проблематики ергономіки даного автомобіля [1]. Вплив мехатронних елементів на комфортність і безпечність роботи операторів мобільних машин відображено в роботах [2,3,4], але не досліджувалось питання одночасного впливу як ергономічних, так і мехатронних показників на надійність і ефективне функціонування системи «оператор – мобільна машина». Антонелі Р., Коста Л., Естархіо А., Кейрос Р., Мартінс Ф., Мелло А. було дослідження ергономічні показники крісла водія та його матеріалів [5]. Пози для комфортного водіння визначили Парк С., Кім С. [6]. Науковцями Окунрібидо О., Шимблесом С. здійснено дослідження робочого місця водія автобуса, виокремлено вплив пози сидіння на та засобів керування автобусом на здоров'я водія [7]. Також дослідженням здоров'я водія автобуса займались Гоутам, С., Рамнат, М., Судхарсан, С., Кумар, Б. Л., Праніт, В., Дінеш, С. [8]. Однак відсутні дослідження, які б виокремили загальні ергономічні показники і потенціальні можливості мехатронних систем для комерційного транспорту (вантажні автомобілі, трактори, комбайни).

Постановка завдання. Метою даної роботи є вплив ергономічної специфіки організації й наповнення мехатронними елементами робочого місця оператора в системі «оператор – мобільна машина».

Задачі:

1. Дати характеристику робочого місця оператора мобільної машини (автомобіля, трактора, комбайна).

2. Встановити основні ергономічні параметри та вимоги до них в системі «оператор – мобільна машина».

3. З'ясувати оснащеність сучасних мобільних машин ефективними мехатронними системами та виявити їх функціональні можливості.

Виклад основного матеріалу. Ергономіка – це наука про проектування машин, продуктів й систем для максимального підвищення безпеки, комфорту та ефективності діяльності основного й вирішального чинника – людини, що забезпечується застосуванням наукових принципів, методів й даних, отриманих із таких наукових сфер як: промислова інженерія, соціологія, психологія, антропометрія, біомеханіка й фізіологія, кіберфізика та мехатроніка, економіка, медицина тощо [10].

У дослідженнях з ергономіки, система «людина - середовище» розглядається як одне ціле, а досягнення кінцевого результату проектування забезпечується найбільш раціональним поєднанням параметрів (розмірів й форми, фізичної сили та обмежень, здібностей й навичок) людини та характеристик машини, що повинне створити оптимальні умови їх взаємодії та забезпечити безпечні умови праці й досягнення фізичного, психічного та соціального благополуччя людини [11].

На поточний час ергономіка проявляється багатьма різними формами й є невід'ємною частиною діяльності людини у всіх, без виключення сферах, найбільш важливою з яких беззаперечно виступає машинобудування.

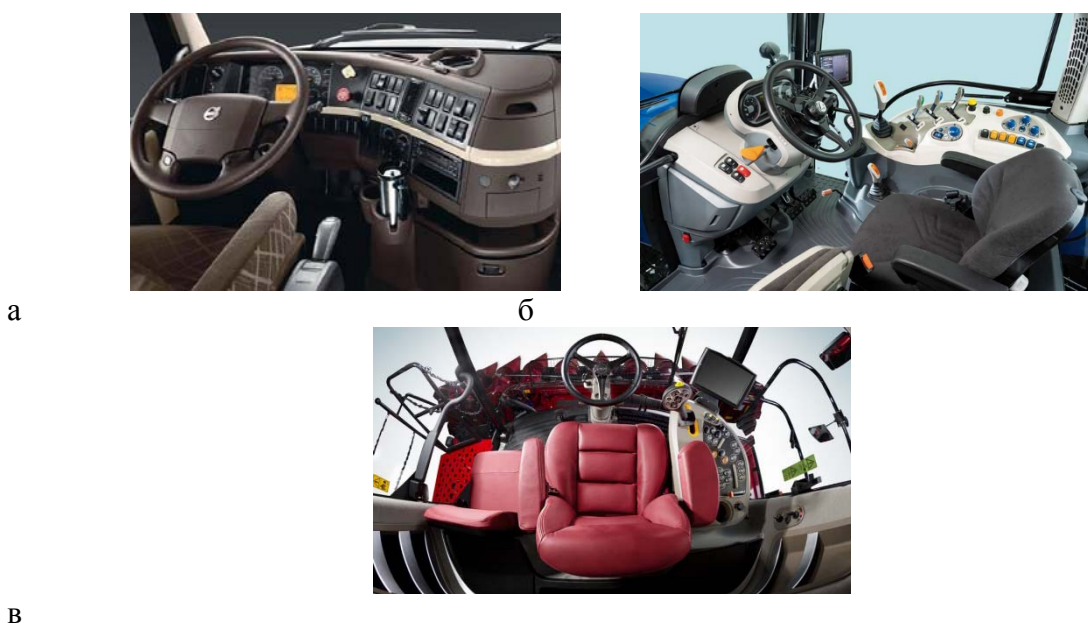
Вона безпосередньо залежить від мобільної машини (ММ) на конструкцію транспортних засобів вже на перших етапах їх проектування, концептуально забезпечуючи необхідний майбутній зв'язок із умовами їх використання, комфортом та безпекою, економічністю й продуктивністю робочих процесів тощо [12].

В найбільшій мірі це стосується ергономіки робочих місць операторів (водіїв), які безпосередньо забезпечують реалізацію функціоналу ММ. До основних факторів впливу на рівень ергономічності внутрішнього простору кабін ММ прийнято відносити: ступінь заповнення робочого простору; доступність посадки та висадки; комфортність (зручність посадки в сидіння, рівень шуму та вібрацій, мікроклімат) [13]; тактильні відчуття й сенсорне сприйняття; зручність роботи із органами керування (їх розташування та зусилля, що прикладаються); оглядовість та зовнішню видимість.

Ергономічна специфіка організації наповнення робочих місць залежить від характеру роботи, що виконується й поставлених завдань та особливостей предметного середовища. На рис. 1 представлені типові сучасні робочі місця водія вантажного автомобіля та операторів трактора й комбайну, Можна бачити, що за ергономічними показниками вони мають багато спільного.

У відповідності до існуючої класифікації робочих місць (таблиця 1), мають й суттєві відмінності, що обумовлюється різними умовами експлуатації машин (таблиця 2), специфікою роботи й тривалістю робочих змін.

Спільним в організації їх робочих місць є те, що розташування водія (оператора) визначається безпосередньо умовами керування ММ (автомобілем, трактором, комбайном), що зумовлює активацію органів керування (керма, важелів, педалей, перемикачів, кнопок, джойстиків, дисплею тощо), здійснюється спостереження за дорогою та характером руху, індикаторами панелі приладів та обмеженнями, що накладаються правилами безпеки використання систем і механізмів.



в

а – вантажні автомобілі; б – трактори; в – комбайни.

Рисунок 1 – Особливості організації робочих місць транспортних засобів, дорожньої та сільськогосподарської техніки

Джерело: розроблено на основі [14].

Таблиця 1 – Характеристика робочого місця водія автомобіля, оператора трактора й комбайна у відповідності і до прийнятої класифікації

Критерій диференціації робочих місць	Класифікаційний ряд робочих місць
За кінцевим продуктом	Основне
За категорією працівника	Оператор
За взаємодією працівників	Індивідуальне
За способом розміщення	Ізольоване
За способом керування засобами праці	Ручне керування, механізоване або автоматизоване
За рівнем спеціалізації засобів праці	Спеціалізоване
За кількістю основного обладнання	Одна мобільна машина
За ступенем переміщення людини	Переміщення разом із транспортним засобом (машиною)
За ступенем рухомості робочого місця	Нерухоме
За положенням тіла працівника	Сидячи

Джерело: розроблено авторами з використанням роботи [15].

Зазначимо, що при цьому дуже важливо забезпечити можливість виконання водієм (оператором) певних рухів із мінімальними змінами його пози та максимальної природності, через те, що робочий процес може тривати до 12 годин на добу; задля формування раціональної амплітуди рухів та уникнення їх зайвої кількості, управління машиною має бути простим та зручним, а необхідне зусилля оператора під час впливу на органи керування – мінімальним. Педалі, важелі й кнопки повинні бути раціонально розташовані, із забезпеченням інтуїтивності їх знаходження та легкості активації й фіксації. Важливим фактором при цьому виступає правильність проектування робочого місця, оскільки від рівня його комфортності залежить як рівень продуктивності праці, так й вірогідність виникнення ризиків травмування оператора та інші фактори [17]. Зазначене дозволило визначити певні відмінності у вимогах до ергономіки робочих

місце водія вантажного автомобіля та оператора трактора (таблиця 3).

Таблиця 2 – Основні ергономічні параметри системи оператор-мобільна машина

Ергономічні параметри	Водій вантажного автомобіля	Тракторист (комбайнер)
Тип руху	Високі швидкості, переважно дороги із твердим покриттям загального користування	Низькі швидкості, складний рельєф (грунтові дороги, поле (грунт, стерня, рілля))
Час роботи	Тривалі поїздки, але із визна-ченими плановими перервами (наприклад, за тахографом)	Довгі зміни (інколи понад 10 годин), часто безперервна робота впродовж сезону
Рівень вібрацій	Мінімальні вібрації на дорогах з якісними асфальтобетонним покриттям	Високий рівень вібрацій через нерівність ґрунту
Керування	Стабільний рух, інколи робота із причепами та виконання навантажувально-розвантажувальних операцій	Постійна зміна швидкості, маневрування на полі, керування навісним обладнанням
Кліматичні умови	Переважно робота на дорогах загального користування	Робота в польових умовах під відкритим небом при підвищеному рівні запиленості, ймовірність перегріву

Джерело: розроблено авторами з використанням роботи [16].

Таблиця 3 – Вимоги до ергономічних параметрів в системі оператор-мобільна машина

Ергономічні параметри	Водій вантажного автомобіля	Тракторист (комбайнер)
Ергономіка сидіння та компенсація вібрацій	- амортизація сидіння важлива, але основний акцент спрямований на зручну позу для тривалого сидіння; - широкий діапазон налаштувань сидіння для різної комплекції водія.	- сидіння повинно мати амортизацію, оскільки трактор працює на нерівних поверхнях; - обов'язкові підлокітники, регулювання нахилу, підголівник для зменшення втоми; - потрібна вібраційна ізоляція кабіни та сидіння.
Органи управління та прилади	- панель приладів оптимізована для довготривалого руху по трасі, зручний доступ до мультимедіа, тахографа, кондиціонера та ін. ; - управління автоматизоване, зменшений рівень фізичного навантаження на водія.	- багато додаткових органів управління (важелі, джойстики, монітори) для контролю навіску, гідравліки, трансмісії, GPS; - прилади розташовані так, щоб забезпечити швидкий доступ без відволікання від контролю за полем; - важливою є захищеність електроніки від пилу та вологи.
Оглядовість та система дзеркал	- велика площа дзеркал для контролю кузова/причепа; - додаткові камери для маневрування на паркувальних та завантажувальних майданчиках.	- панорамна оглядовість для контролю роботи навісного обладнання; - камери заднього виду та бічного спостереження для безпечного маневрування.
Комфортність робочого простору	- важливий комфорт для тривалих поїздок: спальне місце, кондиціонер, обігрів, холодильник; - ергономічне розташування керма, панелі управління для зниження втоми.	- посилена шумо- й теплоізоляція кабіни через польові умови роботи; - фільтрація повітря від пилу (важливо у періоди збирання врожаю); - додаткові джойстики та екрани для управління агросистемами.
Системи безпеки	- системи контролю смуги руху, екстреного гальмування, адаптивного круїз-контролю, контролю сну, алкогольні блокувальники та ін.	- блокування руху при неправильному положенні навісного обладнання; - контроль стабільності руху на схилах - автоматичне вимкнення двигуна при виході з кабіни.

Джерело: розроблено авторами.

Ергономіка робочого місця оператора ММ безпосередньо впливає й на показники надійності, оскільки комфорт та зручність роботи водія (оператора) впливають на його увагу та концентрацію, точність та тривалість керування, своєчасність виявлення поломок й несправностей та наступних сервісних дій.

Виявлено, що зменшення рівня втоми оператора забезпечується роботою у зручних умовах при розміщенні його у оптимізованому ергономічному кріслі, забезпеченні хорошої видимості за оптимального розташування органів управління. При цьому зменшується ймовірність появи помилок, які можуть спричинити некоректну роботу систем й механізмів ММ й передчасну появу їх несправностей й відмов.

Зручне розташування важелів, педалей та панелі керування, формує у оператора ММ більш швидку та правильну реакцію на ситуацію, що знижує ризик механічного та/або температурного перевантаження їх систем і механізмів й забезпечує більш точне і керування ними.

Оптимальна з ергономічної точки зору продумана кабіна машини, з якісною інформаційною панеллю, дає можливість оператору вчасно помітити попереджувальні сигнали про наявні несправності (наприклад, знижений рівень та підвищену температуру оливи та охолоджувальної рідини двигуна або трансмісії). Це запобігає появі несправностей та/або аварійних поломок й упереджує наступні невідворотні позапланові та вартісні сервісні й ремонтні дії.

Постійний вплив вібрацій й шуму під час експлуатації ММ формує негативні наслідки для здоров'я оператора та його здатність зосереджуватися, а неправильні дії через дискомфорт можуть призвести до перевантаження окремих систем і механізмів машини. Це стосується, передусім, двигуна, силової гідравліки, трансмісії, гальмівної системи тощо. В той час як зручне та безпечне розташування важливих систем (гальм, запобіжників, аварійних перемикачів тощо) навпаки, знижує ризик виникнення аварійних ситуацій.

Визначено, що підвищення рівня комфортності робочого місця оператора ММ мінімізує ризик появи помилок, забезпечує кращий рівень контролю за станом машини й формує більш тривалий її експлуатаційний термін. Саме тому, продумана ергономіка система «оператор – мобільна машина» це не просто зручність, але й один із ключових факторів конструкційної та експлуатаційної надійності машин. При цьому забезпечується збільшений час безвідмовної роботи ММ, знижується інтенсивність та ймовірність появи відмов у критичний момент експлуатації ММ, мінімізуються витрати на технічне обслуговування та тривалість простоїв техніки під час проведення ремонтних дій.

Інтенсивний розвиток світової машинобудівної галузі, який відбувається останнім часом, вносить важливі зміни до конструкцій сучасних автомобілів, тракторів й комбайнів та ергономіки їх робочих місць, концептуально змінюючи взаємозв'язки в системі «оператор - мобільна машина» [18]. Сучасні ММ – це високотехнологічні машини, оснащені мехатронними системами, що забезпечують автоматизацію виконання технологічних процесів, знижують витрати палива, покращують та полегшують керування машинами, мінімізують дію людського фактору тощо. Наведено сукупність найбільш ефективних мехатронних систем, якими оснащені сучасні ММ:

1. Мехатронні системи керування рухом та навігації:

- GPS-навігація та автопілот – для автоматичного керування машиною за заданою траєкторією із підвищеним рівнем точності (до декількох сантиметрів);
- ISOBUS – є універсальним стандартом зв'язку між машиною й навісним обладнанням, що дозволяє керувати різними агрегатами через один дисплей;
- автоматичне рульове управління, що забезпечує рівномірні проходи без перекриттів й пропусків.

2. Мехатронні системи двигуна та трансмісії:

- електронне керування двигуном (ECU – Engine Control Unit), що забезпечує регулювання подачі палива, оптимізує роботу двигуна, знижує витрати пального тощо;
- варіаторні трансмісії (CVT – Continuously Variable Transmission), які забезпечують плавну зміну швидкості руху машини без ривків й втрат потужності.
- система інтелектуального управління повним приводом, що автоматично перемикає між 2WD й 4WD в залежності від умов та режимів роботи.

3. Мехатронні системи контролю роботи агрегатів:

- система автоматичного регулювання навісного обладнання, яка контролює глибину оранки, тиск на ґрунт, продуктивність плуга або сівалки;
- автоматичне регулювання висоти жатки в комбайнах, що формує рівномірний зріз, зменшуючи втрати врожаю;
- змінне внесення добрив й насіння (VRA – Variable Rate Application), що дозволяє точно дозувати добрива або насіння у відповідності до стану ґрунту;

4. Мехатронні системи моніторингу та діагностики:

- система телеметрії, яка передає дані про стан трактора або комбайна в режимі реального часу (витрата пального, навантаження, температура тощо);
- сенсори зносу деталей, що контролюють стан ключових вузлів й прогнозують необхідність технічного обслуговування;
- система запобігання поломкам (Predictive Maintenance), яка аналізує роботу техніки та попереджає про можливі несправності.

5. Мехатронні системи безпеки і комфорту:

- антипробуксовочна система (ASR – Anti-Slip Regulation), як обумовлює запобігання буксуванню коліс на ґрунті;
- камери 360°-огляду та датчики перешкод, що допомагають контролювати рух заднім ходом й працювати в обмеженому просторі, підвищуючи безпеку руху;
- системи автоматичного гальмування з датчиками наближення, що запобігає зіткненням;
- система контролю втоми оператора, що рекомендує перерву у його роботі;
- автоматична система клімат-контролю та шумоізоляції кабіни, що регулює рівень температури й шуму, підвищуючи комфорт оператора.

Беззаперечно, сучасні мехатронні системи суттєво змінюють ергономіку робочого місця оператора ММ, підвищуючи продуктивність, комфорт й точність роботи механізмів машин, але й безумовно здійснюють вплив на зміну їх експлуатаційної надійності. Причому, як показали результати проведених досліджень, цей вплив є неоднозначним (рис. 2 і рис. 3).

Високий рівень оснащення машин (автомобілів, тракторів, комбайнів) мехатронними системами покращує їх ергономіку, роблячи керування більш комфортним й менш енерговитратним для оператора. Одночасно, при коректній роботі та регулярному своєчасному обслуговуванні систем, це підвищує рівень їх експлуатаційної надійності.

Виявлено, що залежність від електроніки робить машину більш чутливою до складних умов експлуатації та підвищує витрати на її ремонт у разі появи відмов.

Проведені дослідження дають можливість зазначити, що мехатронні системи – це значний позитивний крок у розвитку мобільних машин, але їх ефективність залежить від ступеня конструктивної досконалості, рівня узгодженості елементів в системі оператор – мобільна машина, правильного й грамотного застосування, якісного й своєчасного проведення сервісних й ремонтних дій та інших факторів.



Рисунок 2 – Вплив рівня забезпеченості машини мехатронними системами на ергономіку робочого місця

Джерело: розроблено авторами.



Рисунок 3 – Вплив рівня забезпеченості машини мехатронними системами на рівень її експлуатаційної надійності

Джерело: розроблено авторами.

При великій кількості мехатронних систем ергономіка машини потребує проведення оптимізації її конструктивних та функціональних елементів. При цьому основними перспективними напрямками можна вважати використання:

- інтуїтивних інтерфейсів - сенсорних дисплеїв із логічним розташуванням функцій;
- голосових команд та швидкого доступу – для можливість голосового керування або програмованих гарячих клавіш;
- автоматичного налаштування робочого місця – персоналізованих профілів для різних операторів;
- зменшення надмірних сповіщень – впровадженням адаптивних систем, що повідомляють лише про критичні параметри;
- навчання операторів – проведення регулярних тренінгів і використання нових технологій.

Проведені в даній роботі дослідження свідчать, що малодослідженим залишається вплив рівня оснащення машин мехатронними системи на показники їх експлуатаційної надійності.

Висновки

1. З'ясовано роль ергономіки при проектуванні і функціонуванні робочого місця оператора мобільних машин (автомобіля, трактора, комбайна). Виявлено вплив основних факторів на рівень ергономічності внутрішнього простору кабін мобільних машин: ступінь заповнення робочого простору, ступінь посадки та висадки, комфортність, тактильні відчуття і сенсорне сприйняття, зручність роботи із органами керування, оглядовість та зовнішня видимість.

2. Встановлено основні критерії диференціації та класифікації робочих місць операторів мобільних машин. Виявлені основні ергономічні параметри для системи «оператор – мобільна машина», дано їх характеристики та сформульовані вимоги до ергономічних параметрів. Виявлено вплив ергономічних параметрів на експлуатаційну надійність мобільних машин.

3. Показано як інтенсивний розвиток сучасної машинобудівної галузі вносить важливі зміни до конструкції автомобілів, тракторів, комбайнів та ергономіки їх робочих місць.

4. Обґрунтовано та наведено найбільш ефективні мехатронні системи сучасних мобільних машин. Дано їх функціональні характеристики.

5. Визначено позитивні і негативні впливи мехатронних систем на ергономіку робочого місця оператора мобільної машини.

6. Обґрунтовано вплив рівня забезпеченості мобільних машин мехатронними системами на рівень їх експлуатаційної надійності, зазначено як позитивні фактори, так і потенційні проблеми. Сформульовано основні перспективні напрямки використання мехатронних систем.

Список літератури

1. Chowdhury, A., Kachare, C. (2021). Ergonomic evaluation of a car interior: a case example on shelby Cobra. In *Ergonomics for Improved Productivity: Proceedings of HWWWE 2017* (pp. 65-71). Springer Singapore.
2. Голуб Д.В., Аулін В.В. Математична модель підвищення якості управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький*, 2024. Вип. 9(2). С. 66-78.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. та ін. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія. Кропивницький: видавництво ТОВ «КОД», 2017. 370с.
4. Аулін В.В., Голуб Д.В. Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочиснення автомобіля. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 9(40), ч.ІІ 77 7(38). Ч.1. С. 167-176.*

5. Antonelli, R. A., Costa, L. C. C., Eustachio, A. M. N., et al. (2013). *Development of a methodology focused on the improvement of both: ergonomics and comfort of commercial vehicle seats* (No. 2013-36-0216). SAE Technical Paper.
6. Park, S. J., Kim, C. B., Kim, C. J., et al. (2000). Comfortable driving postures for Koreans. *International journal of industrial ergonomics*, 26(4), 489-497.
7. Okunribido, O. O., Shimbles, S. J., Magnusson, M., et al. (2007). City bus driving and low back pain: a study of the exposures to posture demands, manual materials handling and whole-body vibration. *Applied ergonomics*, 38(1), 29-38.
8. Gowtham, S., Ramnaath, M., Sudharsan, et al. (2020, August). Seating comfort analysis: a virtual ergonomics study of bus drivers in private transportation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 912, No. 2, p. 022018). IOP Publishing.
9. Cășeriu B., Blaga P. Considerations regarding the ergonomics of the vehicle interior, George Emil Palade University of Medicine, Pharmacy, Science, and Technology of Targu Mures. Targu Mures. 32–37.
10. G. M.Sammonds, M.F.Neilm, J .Mansfield, Effect of long term driving on driver discomfort and its relationship with seat fidgets and movements, 58, 119-127 (2017)
11. Sammonds, G. M., Fray, M., & Mansfield, N. J. (2017). Effect of long term driving on driver discomfort and its relationship with seat fidgets and movements (SFMs). *Applied ergonomics*, 58, 119-127..
12. Li, Q., & Wu, Y. (2023). Ergonomics Research of Domestic Vehicle Cab Central Control System Based on Entropy Method. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 147-161). Cham: Springer Nature Switzerland.
13. Аулін В. В., Магопєць М. С. Формування мікроклімату в салонах автотранспортних засобів підігрівачами різної конструкції. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9 (2). С. 146-157
14. Робоче місце оператора. Agriculture New Holland : веб-сайт. URL: agriculture.newholland.com/eu/uk-ua/equipment/за-типом/agricultural-tractors/t9/details/operator-environment.
15. Методичні рекомендації щодо визначення робочих місць. *LigaZakon* : веб-сайт. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN10624>
16. Negoita, O. D., Chivu, O., Babis, C., Gligor, A. (2019). Researches on the ergonomic design of the workplace for the car driver profession. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 290, p. 12022). EDP Sciences.
17. Zenk, R., Franz, M., Bubb, H., Vink, P. (2012). Spine loading in automotive seating. *Applied ergonomics*, 43(2), С. 290-295.
18. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замурєнко А.С. Розробка математичної моделі мехатронного модуля системи рульового управління вантажних автомобілів. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: матеріали конф. V Міжнар. наук.-практ. конф.*, 19-21 квіт. 2023 р., м. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С. 9-11.

References

1. Chowdhury, A., Kachare, C. (2021). Ergonomic evaluation of a car interior: a case example on shelby Cobra. In *Ergonomics for Improved Productivity: Proceedings of HWWE 2017* (pp. 65-71). Springer Singapore.
2. Holub, D. V., & Aulin, V. V. (2024). Matematychna model pidvyshchennia yakosti upravlinnia mekhatronnoiu systemoiu mikroklimatu salonu avtomobilia [Mathematical model for improving the quality of control of the mechatronic microclimate system of a car cabin]. *Central Ukrainian Scientific bulletin. Technical Sciences*, 9(2), 66–78 [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Holub, D.V.& Hryn'kiv, A.V. et al. (2017). Metodolohichni i teoretychni osnovy zabezpechennia ta pidvyschennia nadijnosti funktsionuvannia avtomobil'nykh transportnykh system [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems]. *Kropyvnyts'kyj: Vydavnytstvo TOV "KOD"* [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2023). Obgruntuvannia mekhanizmu funktsionuvannia mekhatronnoi systemy skloochyschennia avtomobilia [Justification of the mechanism of operation of the mechatronic system of car windshield cleaning]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 7(38), 1, 167-176 [in Ukrainian].
5. Antonelli, R. A., Costa, L. C. C., Eustachio, A. M. N., et al. (2013). *Development of a methodology focused on the improvement of both: ergonomics and comfort of commercial vehicle seats* (No. 2013-36-0216). SAE Technical Paper.
6. Park, S. J., Kim, C. B., Kim, C. J., & Lee, J. W. (2000). Comfortable driving postures for Koreans. *International journal of industrial ergonomics*, 26(4), 489-497.
7. Okunribido, O. O., Shimbles, S. J., Magnusson, M., & Pope, M. (2007). City bus driving and low back pain: a study of the exposures to posture demands, manual materials handling and whole-body vibration. *Applied ergonomics*, 38(1), 29-38.

8. Gowtham, S., Ramnaath, M., Sudharsan, et al. (2020, August). Seating comfort analysis: a virtual ergonomics study of bus drivers in private transportation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 912, No. 2, p. 022018). IOP Publishing.
9. Cășeriu B., Błaga P. Considerations regarding the ergonomics of the vehicle interior, George Emil Palade University of Medicine, Pharmacy, Science, and Technology of Targu Mures. Targu Mures. 32–37.
10. G. M.Sammonds, M.F.Neilm, J .Mansfield, Effect of long term driving on driver discomfort and its relationship with seat fidgets and movements, 58, 119-127 (2017).
11. Sammonds, G. M., Fray, M., & Mansfield, N. J. (2017). Effect of long term driving on driver discomfort and its relationship with seat fidgets and movements (SFMs). *Applied ergonomics*, 58, 119-127.
12. Li, Q., & Wu, Y. (2023). Ergonomics Research of Domestic Vehicle Cab Central Control System Based on Entropy Method. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 147-161). Cham: Springer Nature Switzerland.
13. Aulin, V. V., Mahopets, M. S. (2024). Formuvannia mikroklimatu v salonakh avtotransportnykh zasobiv pidhrivachamy riznoi konstruksii [Formation of microclimate in car cabins with heaters of various designs]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(2), 146–157 [in Ukrainian].
14. Roboche mistse operatora. *Agriculture New Holland*. Retrieved from agriculture.newholland.com/eu/uk-ua/equipment/za-tipom/agricultural-tractors/t9/details/operator-environment
15. Metodichni rekomendatsii shchodo vyznachennia robochykh mist. (n.d.). *LigaZakon*. Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/FIN10624>
16. Negoita, O. D., Chivu, O., Babis, C., Gligor, A. (2019). Researches on the ergonomic design of the workplace for the car driver profesion. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 290, p. 12022). EDP Sciences.
17. Zenk, R., Franz, M., Bubb, H., Vink, P. (2012). Spine loading in automotive seating. *Applied ergonomics*, 43(2), 290-295.
18. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Zamurenko, A.S. (2023). Rozrobka matematychnoi modeli mekhatronnoho modulia systemy rul'ovoho upravlinnia vantazhnykh avtomobiliv [Development of a mathematical model of the mechatronic module of the truck steering system]. Increasing the reliability and efficiency of machines, processes and systems: *V Mizhnar. nauk.-prakt. konf.(19-21 kvit. 2023 r.) - V International science and practice conf. (pp. 9-11)*. Kropyvnyts'kyj: TsNTU [in Ukrainian].

Mykhailo Mahopets, **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Andrii Hrynkiv**, senior researcher, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Influence of Ergonomics and Mechatronics Elements on the Functioning of the “Operator – Mobile Machine” System

The article is devoted to the main aspects of ergonomics of workplaces of drivers of vehicles and operators of agricultural machinery. The importance of an ergonomic approach at the stage of design and operation of mobile machines is substantiated to ensure comfort, safety, efficiency of the operator's work and reliability of the "operator - mobile machine" system. The factors influencing the ergonomics of the operator's workspace are analyzed, their comparative characteristics are given taking into account the specifics of their operation. The ergonomic parameters of a truck, tractor and combine are analyzed.

Particular attention is paid to the influence of ergonomics on the operational reliability of mobile machines, as well as to reducing the likelihood of errors due to operator fatigue, since the comfort and convenience of the driver's (operator's) work affect his attention and concentration, accuracy and duration of control, timeliness of detection of breakdowns and malfunctions and subsequent service actions. It was found that reducing the level of operator fatigue is ensured by working in comfortable conditions when placing him in an optimized ergonomic chair, ensuring good visibility with the optimal location of the controls. Modern mechatronic control systems are described, which contribute to the automation of work processes and increasing the accuracy of machine control.

A high level of equipping machines (cars, tractors, combines) with mechatronic systems improves their ergonomics, making control more comfortable and less energy-consuming for the operator. At the same time, with correct operation and regular timely maintenance of the systems, this increases the level of their operational reliability. It was found that the presence of a large number of electronics makes the machine more sensitive to difficult operating conditions and increases the costs of its repair in the event of failures. It is concluded that ergonomics and mechatronics are key factors in ensuring the safety, efficiency and trouble-free operation of mobile machines.

operator-mobile machine system, ergonomics, mechatronic systems, ergonomic indicators, efficiency, reliability

Одержано (Received) 14.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 19.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

УДК 631.313.6

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.158-166](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.158-166)

Ю. В. Мачок, доц., канд. техн. наук, **Д. Ю. Артеменко**, доц., канд. техн. наук,
В. В. Амосов, доц., канд. техн. наук, **Д. І. Петренко**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: machokuv@ukr.net

Обґрунтування пристрою для зменшення тягового опору плуга

Проведений аналіз конструкцій і досліджень плугів, показав, що перспективним напрямом зниження енергоємності процесу оранки є максимальне зменшення тертя п'яти польової дошки об стінку борозни. Запропоновано встановлення у задній частині польової дошки корпусу плуга активного елемента кочення у вигляді вальця бочкоподібного типу, який перетворює тертя ковзання в тертя кочення та знижує енергоємність процесу оранки. Розроблено математичну модель для теоретичного визначення основних параметрів пристрою для зменшення тягового опору корпусу плуга та встановлено залежності, які впливають на процес його роботи.

корпус плуга, польова дошка, навантаження на корпус, активний елемент польової дошки, зменшення тягового опору, зменшення сил тертя

Постановка проблеми. На сьогоднішній день підхід до землеробства набув багатогранного характеру, це знайшло прояв у зростаючому застосуванні інноваційних технологій вирощування сільськогосподарських культур. Разом із цим активно впроваджуються нові сільськогосподарські машини, конструкції яких поєднують сучасні технологічні та технічні рішення для реалізації процесів обробітку ґрунту [1,2]. Успішне використання машин і знарядь для обробітку ґрунту можливе за умови дотримання ключових вимог: мінімізації енергоємності та забезпечення високої якості виконання технологічного процесу [3,4].

Хоча розвиток технологій і здійснює значний вплив на процеси обробітку ґрунту, і оранка залишається актуальним важливим процесом в агротехнологіях. Оранка дає змогу ефективно підрізати та загортати у ґрунт бур'яни, їх насіння, залишки добрив і пожнивні рештки попередніх культур, а також сприяє підйому колоїдних часток, які зазвичай вимиваються опадами в нижні горизонти ґрунту. Крім того, оранка вважається одним із найефективніших методів боротьби зі шкідниками та хворобами рослин. Це дає змогу включати її до екологічно безпечних технологій землеробства, що зменшують необхідність застосування хімічних засобів захисту рослин [5].

Технологічний процес оранки є одним із найбільш енергоємних серед усіх технологічних операцій рослинництва. Основна частина витрат енергії припадає на подолання сил тертя ґрунту об робочі елементи плуга, які досягають максимальних значень при оранці вологих і перезволожених ґрунтів. Під час роботи плуга на ґрунтах із різними фізико-механічними властивостями та при оранці на різну глибину часто спостерігається нестійкий прямолінійний рух. Це пов'язано з нерівномірним тиском ґрунту на робочі органи плуга. Так, при роботі на легких ґрунтах тиск, який створюється на робочі органи, передається на польову дошку, яка через недостатню зв'язаність ґрунту може просідати і зміщувати корпус у сторони [6-8]. Для компенсації таких недоліків доводиться встановлювати розширювач польової дошки, а це може збільшувати тяговий опір корпусу. Тому актуальним є підвищення ефективності роботи елементів корпусу плуга і їх подальше вдосконалення направлене на зменшення тягового опору в цілому.

© Ю. В. Мачок, Д. Ю. Артеменко, В. В. Амосов, Д. І. Петренко, 2025

Аналіз основних досліджень і публікацій. В сучасній літературі є багато наукових робіт, спрямованих на зменшення тягового опору плуга за рахунок удосконалення його елементів або технологічного процесу їх роботи та принципів дії на ґрунт. Тому проаналізуємо роботи, які пропонують найбільший ефект від використання змін в конструкції на зменшення тягового опору.

Так, в роботі Єрмакова С.В. [9], пропонується виконувати конструкції орних агрегатів вібраційними. Для здійснення цієї мети в леміш корпусу встановлюється пневмомолоток, який дає можливість здійснюючи зворотно-поступальний рух по ходу трактора, віброударами розпушувати ґрунт, зменшуючи опір його руйнування лемішами. Проведені експериментальні дослідження такого підходу показали позитивний ефект по зменшенню тягового опору плуга. Але в дослідженні увага приділяється лише лемішу корпусу і не приділяється польовій дошці, а значний відсоток тягового опору корпусу виникає саме на ній.

Дзюба О.А. для зменшення тягового опору орного агрегату пропонує замість польової дошки використовувати активний блок польового диска з опорним колесом, які мають вирізи та приводяться до руху гідравлічним мотором [10]. Виконання польової дошки у вигляді диска з вирізами і примусовим обертанням на думку авторів може суттєво зменшити опір орного агрегату і зменшити витрати паливно мастильних матеріалів на виконання операції оранки. Але в запропонованій конструкції є один суттєвий недолік – використання гідравлічного двигуна примусового приводу диска з опорним колесом потребує постійного догляду за справністю системи і її обслуговування, а несвоєчасність проведення ремонтних робіт приводу може звести нанівець всі переваги такої конструкції.

Кутковецька Т.О. в [11] наголошує, що за рахунок зменшення тертя польової дошки корпусу плуга можна зменшити тяговий опір орного агрегату до 35-40%, а використання додаткових пристроїв з боку польової дошки є доцільним і ефективним. Автор пропонує встановлювати плоскорізальні робочі елементи з боку польового обрізу, що може забезпечити більшу стійкість ходу орного агрегату та зниження енергоємності виконання технологічного процесу оранки. Однак розміщення додаткових елементів з боку польового обрізу тягне за собою додаткове їх обслуговування і своєчасну заміну, а оскільки такі елементи працюють при значних навантаженнях і терті то частота їх заміни буде високою, а обслуговування буде нести додаткові фінансові витрати.

Стародинський Д.З. [12], пропонує для зменшення спрацювання польової дошки і зменшення тягового опору корпусу плуга виконувати її закріплення на підпружиненому вертикальному шарнірі, який допомагає виконувати коливання польової дошки під час зміни навантаження на неї. Також рекомендується в такому виконанні польову дошку оснащувати на робочій поверхні пластиною зі зносостійкого матеріалу. На думку автора, така конструкція може значно покращити зносостійкість поверхні польової дошки і зменшити тяговий опір корпусу в цілому. Але є і суттєвий недолік такої конструкції – вертикальний шарнір з часом може забиватись ґрунтом і втрачати спроможність змінювати положення польової дошки, що може вплинути на роботу агрегату.

Львутін І.Г. [13], продовжуючи удосконалення попередньої конструкції польової дошки з метою підвищення надійності її роботи, рекомендує рухомий шарнір встановлювати в передній частині, а пружинний блок – в задній. На його думку такий підхід сприятиме більш правильному процесу роботи польової дошки і підвищенню надійності самого механізму руху шарніра, а також усунення забивання польової дошки ґрунтом, що в свою чергу буде приводити до зменшення тягового опору

агрегату. Але недоліком такої конструкції є те, що для правильної роботи запропонованого механізму необхідно ретельно слідкувати за справністю всіх його елементів тому, що неправильна робота механізму може змінити тягові характеристики в інший бік.

Курка В.П. в [14], наводить велику кількість конструкцій плугів і їх елементів, аналізуючи які можна впевнено стверджувати, що робота над їх вдосконаленням буде продовжуватись і надалі. А робота над покращенням конструкції польової дошки з метою зменшення її тягового опору є актуальним завданням.

Проведений аналіз конструкцій і досліджень плугів, спрямований на зменшення тягового опору орного агрегату, показав, що на сьогоднішній день не запропоноване рішення, яке могло б забезпечити значне зменшення тягового опору із мінімальними експлуатаційними витратами. Перспективним напрямом для подальшого удосконалення польової дошки корпусу плуга є максимальне зменшення тертя її п'яти об стінку борозни.

Постановка завдання. Мета роботи: обґрунтування конструктивних параметрів пристрою для зменшення тягового опору корпусу плуга для основного обробітку ґрунту.

Для досягнення мети, вирішували наступні задачі:

- провести аналіз сучасних конструкцій корпусів плуга із елементами або механізмами зменшення тягового опору з метою визначення їх переваг і недоліків при виконанні процесу оранки ґрунту;

- розробити математичну модель для теоретичного визначення основних параметрів пристрою для зменшення тягового опору корпусу плуга та встановити залежності, які впливають на процес його роботи.

Викладення основного матеріалу. Енергоефективність із забезпеченням високої якості виконання сільськогосподарських операцій залишається одним із ключових завдань аграрного сектору. Зменшити енерговитрати на підготовку ґрунту для вирощування сільськогосподарських культур можливо двома основними способами: скороченням кількості проходів ґрунтообробної техніки, зменшенням глибини обробітку або навіть повною відмовою від механічного втручання; а також розробкою конструктивних рішень для мінімізації впливу сил тертя на опір, що виникає при роботі основних і допоміжних органів.

Перше завдання переважно вирішується агрономічними службами шляхом впровадження відповідних технологій вирощування рослин. Друге питання є полем діяльності дослідників і конструкторів, які працюють над технічним вдосконаленням.

Подолання впливу сил тертя є особливо важливим у процесі оранки, де їх частка може становити до 60% загального опору плуга [15-17]. Основну роль у формуванні цього опору відіграє корпус плуга, що є пасивним робочим органом. Тертя ковзання, яке виникає під час взаємодії ґрунтової скиби з робочою поверхнею корпусу і польовою дошкою, визначає величину цього опору.

Існують два підходи до зменшення впливу сил тертя:

- технологічний підхід – використання матеріалів із низьким коефіцієнтом тертя при взаємодії з ґрунтом, таких як полімери чи композити;

- конструктивний підхід – часткова або повна заміна тертя ковзання тертям кочення, що дозволяє суттєво знизити опір.

Досягнення цієї мети можливе шляхом мінімізації впливу сил тертя, які виникають під час оранки, зокрема у місці контакту ґрунту з польовою дошкою. Одним із візуальних проявів такого впливу є інтенсивне зношування задньої частини польової дошки, яка піддається найбільшому навантаженню. Для вирішення цієї проблеми

запропоновано встановлення у задній частині польової дошки корпусу плуга активного елемента кочення у вигляді вальця (рис. 1). Це дасть змогу перетворити частину тертя ковзання на тертя кочення, що дозволить знизити тяговий опір плуга приблизно на 10-15% та збільшити термін служби польової дошки.

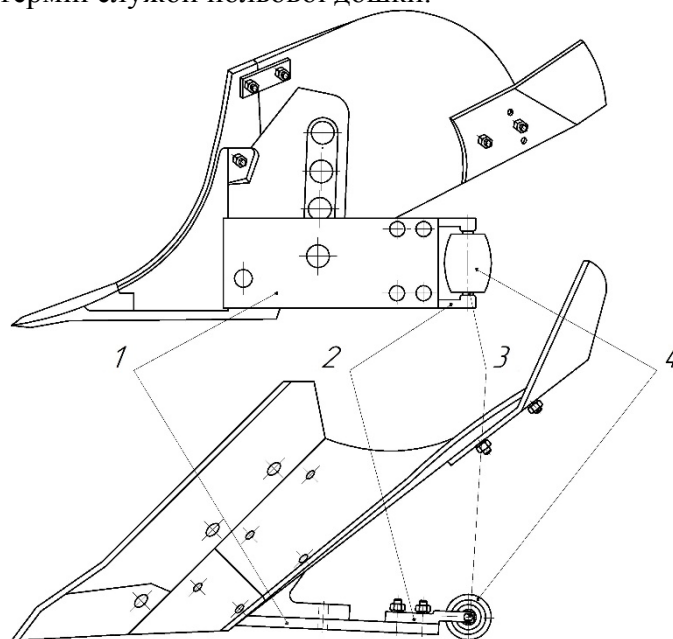


Рисунок 1 – Удосконалений корпус плуга

Джерело: розроблено авторами

Запропонована конструкція корпусу плуга має польову дошку, яка жорстко закріплена в передній частині, а в задній частині ближче до п'яти має активний елемент кочення у вигляді вальця, вісь якого розміщена в вертикальній площині, причому з метою зменшення сил тертя в процесі його кочення по стінці борозни його поверхня виконана бочкоподібною. Польова дошка корпусу плуга має такі складові частини: польова дошка 1, кронштейн 2, вертикальна вісь 3, робоча поверхня вальця 4.

Робочий процес плуга із запропонованим корпусом відбувається таким чином: корпус плуга в робочому положенні, рухаючись у ґрунті, своїм лемішем підрізає шар ґрунту і направляє його на полицю, яка здійснює кришення і укладання ґрунту в борозну. Польова дошка 1 корпусу, приймає на себе навантаження від шару ґрунту, який рухається по полиці, при цьому завдяки розміщенню в задній частині польової дошки елемента кочення у вигляді вальця зменшується навантаження на п'яту. Обертювий рух робочої поверхні вальця 4, який встановлений на вертикальній осі 3 зменшує сили тертя, які виникають у зоні роботи п'яти польової дошки 1, що в свою чергу впливає на зниження тягового опору корпусу. За рахунок конструкції робочої поверхні вальця 4 активного елемента кочення бочкоподібного типу його контакт із стінкою борозни відбувається лише в зоні максимального радіуса кривизни бочкоподібною поверхні в горизонтальній площині, а виникаючі в процесі роботи сили тертя мінімальні. Конструкція кронштейна 2 усуває забивання елемента кочення п'яти ґрунтом і сприяє його самоочищенню.

Ефективність запропонованої конструкції корпусу плуга забезпечується:

- підвищеною надійністю задньої частини польової дошки за рахунок встановлення активного елемента кочення у вигляді вальця бочкоподібного типу, який забезпечує зменшення навантаження на польову дошку, забезпечуючи перетворення тертя ковзання в тертя кочення;

- зменшенням зусилля тертя польової дошки за рахунок обертання вальця в горизонтальній площині і контакту борозни із ним лише в зоні максимального радіуса кривизни бочкоподібної поверхні в горизонтальній площині. Конструкція кронштейна і самого вальця сприяє його самоочищенню і усуванню налипання вологого ґрунту на його робочу поверхню.

Для обґрунтування основних конструктивних елементів польової дошки, а саме – її активного елементу вальця, необхідно розглянути його взаємодію із стінкою борозни. Щоб забезпечити стійкий рух плуга, необхідно збалансувати силу, яка намагається змістити корпус у бік незораного поля, та реакцію ґрунту на польовій дошці. У цьому випадку вирішальне значення мають геометричні параметри польової дошки, які визначають площу контакту з ґрунтом. У такому разі питомий опір зминання ґрунту можна визначити за наступною формулою:

$$Q = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

де Q – питомий опір зминання ґрунту, $H / \text{см}^2$;

P - сила опору ґрунту зминанню, H .

Значимо, що глибина вмивання польової дошки в ґрунт становить $h = 5-10 \text{ мм}$. У процесі такої дії деформується певний об'єм ґрунту, який описується об'ємним коефіцієнтом зминання, що залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту та геометрії польової дошки:

$$q_0 = \frac{P}{V}. \quad (2)$$

Відомо, що $q_0 = 10-25H / \text{см}^2$ [6-8]

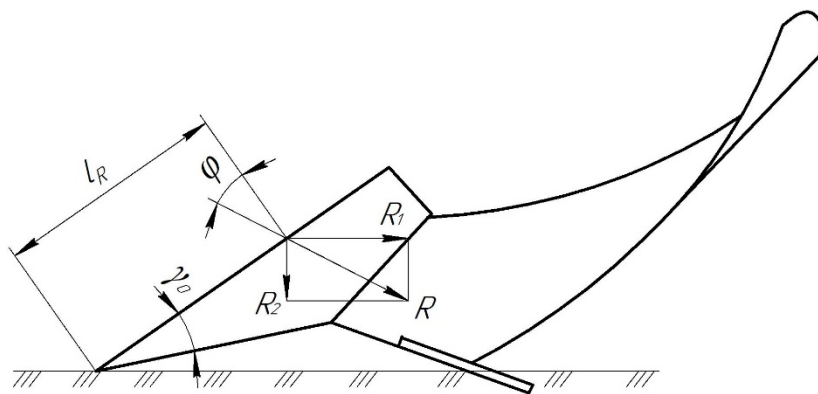


Рисунок 2 – Силове навантаження польової дошки

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи (рис. 2) видно, що сила, яка діє на польову дошку дорівнює

$$R_2 = R \cdot \cos(\gamma_0 + \varphi), \quad (3)$$

де $\gamma_0 = 42^\circ$ - кут установки леміша до стінки борозни;

φ - кут тертя ґрунту об сталь;

R - сила опору ґрунту різанню, H .

Сила опору різанню діє нерівномірно на валець уздовж дуги ACB лінії контакту в місці найбільшого діаметру бочкоподібної поверхні вальця в горизонтальній площині (рис. 3), основою якої є хорда AB . Довжина дуги у зоні, де відбувається зминання ґрунту, може бути визначена за допомогою виразу Гюйгенса [18], що застосовується для наближеного обчислення дуг кривих:

$$L_{\text{дуги}} = 2CB + \frac{2CB - AB}{3}, \quad (4)$$

Оскільки, трикутник BCE прямокутний, то довжина відрізка BC визначиться з виразу:

$$BC = \sqrt{CE^2 - BE^2}, \quad (5)$$

Позначимо

$$AE = BE = l,$$

$$DB = AD = r.$$

тоді

$$AB = 2 \cdot l, \quad (6)$$

$$CE = r - h.$$

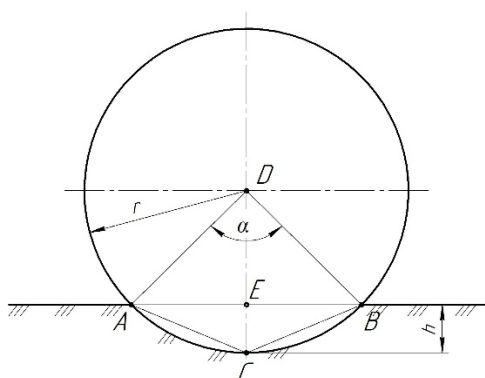


Рисунок 3 – Схема взаємодії вальця з ґрунтом

Джерело: розроблено авторами

Тоді, з трикутника DEB отримаємо:

$$r^2 = (r - h)^2 + l^2. \quad (7)$$

Здійснивши перетворення отримаємо:

$$l = \sqrt{2rh - h^2}. \quad (8)$$

Підставляючи вираз 8 та 5 у вираз 4 і перетворень отримаємо:

$$L_{\text{дуги}} = \frac{8\sqrt{2rh} - 2\sqrt{h(2r - h)}}{3}. \quad (9)$$

де $L_{\text{дуги}}$ - довжина дуги опорної поверхні, см.

Тоді, площа опорної поверхні вальця буде:

$$S_{\text{опори}} = \frac{8\sqrt{2rh} - 2\sqrt{h(2r - h)}}{3} l_{\text{вал}}, \quad (10)$$

де $S_{\text{опори}}$ - площа опорної поверхні польової дошки;

$l_{\text{вал}}$ - довжина твірної вальця, що контактує з ґрунтом, см

Площа сегменту ґрунту, який витискує валець польової дошки визначається:

$$S_{\text{сезм}} = r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{h(2r-h)}. \quad (11)$$

Об'єм ґрунту $V_{\text{зр}}$, який витискується вальцем:

$$V_{\text{зр}} = (r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{h(2r-h)}) \cdot l_{\text{вал}}. \quad (12)$$

Визначимо питому силу тиску вальця на стінку борозни:

$$P_{\text{зр}} = \frac{3R_2}{(8\sqrt{2rh} - 2\sqrt{h(2r-h)}) \cdot l_{\text{вал}}}. \quad (13)$$

Після перетворень отримаємо залежність для визначення радіусу вальця активного елемента кочення польової дошки:

$$r = \left(24 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot R_2^2 \cdot l_{\text{вал}}^2 \cdot h^4}{P_{\text{зр}}^2} - \frac{64 \cdot R_2^2 \cdot l_{\text{вал}} \cdot h^4}{P_{\text{зр}}^2} + \frac{9 \cdot R_2^4 \cdot l_{\text{вал}} \cdot h^2}{P_{\text{зр}}^4} - 64 \cdot l_{\text{вал}} \cdot h^3} + 4 \cdot l_{\text{вал}}^2 \cdot h^3 + \frac{144 \cdot R_2^2 \cdot h}{P_{\text{зр}}^2} + \frac{9 \cdot R_2^2 \cdot l_{\text{вал}} \cdot h}{P_{\text{зр}}^2} \right) / 8 \cdot h^2 \cdot (l_{\text{вал}} - 16) \quad (14)$$

З урахуванням отриманого виразу та припущень, що $l_{\text{рол}} = 140 \text{ мм} = 0,14 \text{ м}$, $h = 5 - 10 \text{ мм} = 0,005 - 0,01 \text{ м}$, $R_2 = 1000 - 2000 \text{ Н}$, $P_{\text{зр}} = 40 \text{ кПа}$ побудуємо графічні залежності раціональних значень радіусу вальця в місці контакту із стінкою борозни від сили, яка діє на польову дошку.

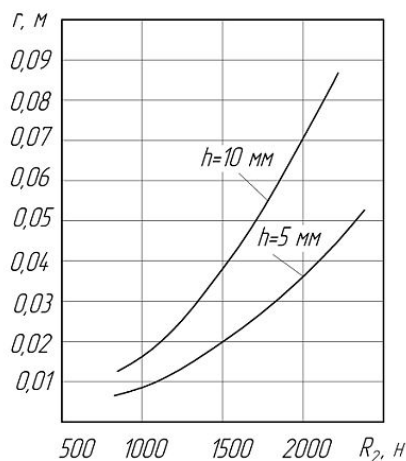


Рисунок 1 – Графік залежності радіусу вальця від сили дії на польову дошку

Джерело: розроблено авторами

Отримані графічні залежності є важливими для практичного застосування. Виходячи з відомих ґрунтово-кліматичних умов, глибини оранки, ширини захвату корпусу плуга та сили, що діє на польову дошку, можна визначити раціональний діаметр вальця. Це дозволить зменшити навантаження на польову дошку та знизити негативний вплив сил тертя під час виконання технологічного процесу.

Висновки.

1. Розроблено математичну модель для теоретичного визначення основних параметрів пристрою для зменшення тягового опору корпусу плуга та встановлено залежності, які впливають на процес його роботи.

2. Запропоновано встановити у задній частині польової дошки корпусу плуга активний елемент кочення у вигляді вальця бочкоподібного типу, який забезпечує зменшення навантаження на польову дошку.

3. Виходячи з відомих ґрунтово-кліматичних умов, глибини оранки, ширини захвату корпусу плуга та сили, що діє на польову дошку, можна визначити раціональний діаметр вальця. Це дозволить перетворити тертя ковзання в тертя кочення та підвищити надійність і знизити енергоємність процесу оранки.

Список літератури

1. Brunotte J., Sommer K., Gattermann B. Architektur moderne Pflanzen. *Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG*. Hasbergen, 2014. 188 p.
2. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Вплив конструктивно-технологічних параметрів комбінованого глибокорозпушувача на обробіток ґрунту. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. 2016. Вип. 46. С. 78-87.
3. Розвиток інтенсивних систем землеробства на зрошуваних землях України: науково-технологічне забезпечення : метод. рекомендації / за ред. Р.А. Вожегової. Херсон : «ОЛДІ-ПЛЮС», 2020. 254 с.
4. Використання сучасних технологій обробітку ґрунту для підвищення якості кукурудзи./ Дробітько А., Качанова Т., Маркова Н., Малкіна В. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2024. Vol. 28, No. 1. P. 19-28. URL: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/1.2024.19>
5. Чернілевський М.С., Білявський Ю.А., Кропивницький Р.Б. Агротехнічні вимоги та оцінка якості обробітку ґрунту : навч. посібник : вид. 2-ге, допов. Житомир : Вид-во «ЖНАУ», 2012. 84 с.
6. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку / Войтюк Д.Г. та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
7. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропивний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Київ : Урожай, 2001. Кн. 1 : Машини для рільництва. 384 с.
8. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Харків : Око, 2002. Т. 1; Ч. 1. Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. 444 с.
9. Розробка і обґрунтування раціональності застосування на корпусах плуга пневморозпушувачів вібраційної дії / Єрмаков С.В. та ін. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2023. Вип. 3 (53). С. 26-31.
10. Орний агрегат: пат. 121013 Україна: МПК А01В 15/20. № а201906157; заявл. 03.06.2019; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5.
11. Кутковецька Т.О. Аналіз способів і засобів зниження навантаження на польову дошку відвального плуга. *Інноваційні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва* : матер. VII міжнар. наук.-практ. online-конф. (27-28 тра. 2021 р., м. Умань). Умань, 2021. С. 53-55.
12. Корпус плуга: пат. 662032 Україна: МПК А01В 15/00. № 2322646/30-15; заявл. 11.02.1976; опубл. 15.05.1979, Бюл. № 18.
13. Корпус плуга: пат. 1160945 Україна: МПК А01В 15/00. № 3598608/30-15; заявл. 30.05.1983; опубл. 15.06.1985, Бюл. № 22.
14. Розвиток конструкцій плуга у XVIII – XXI століттях : монографія / Курка В.П. та ін. Київ : НУБіП України, ЦП «Компринт», 2018. 250 с.
15. Випробування плуга з текроновими полицями : звіт про НДР. Відп. виконавець Надикто В.Т. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 31 с.
16. Проектування сільськогосподарських машин : навч. посібник для виконання курсових проектів з розробки сільськогосподарської техніки при підготовці фахівців напряму 6.100202 “Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва”. / Бендера І.М. та ін. Кам’янець-Подільський : ФОП Сисин О.В., 2011. 640 с.
17. Смолінський С., Смолінська А., Марченко В. Корпус плуга визначає ефективність оранки. *Agroexpert*. 2017. №1. URL: <https://agroexpert.ua/korpus-pluha-vyznachaie-efektyvnist-oranky>.
18. Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика : навч. посібник. Київ : А.С.К., 2006. 648 с.

References

1. Brunotte, J., Sommer, K., & Gattermann, B. (2014). Architektur moderne Pflanzen. Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG.
2. Leshchenko, S. M., Salo, V. M., & Petrenko, D. I. (2016). Influence of constructive and technological parameters of combined deep-rippers on soil cultivation. Designing, Manufacturing and Operating Agricultural Machines, 46, 78–87 [in Ukrainian].

3. Vozhehova, R. A. (Ed.). (2020). Development of intensive farming systems on irrigated lands of Ukraine: Scientific and technological support (Methodological recommendations). OLDI-PLUS [in Ukrainian].
4. Drobitko, A., Kachanova, T., Markova, N., & Malkina, V. (2024). Use of modern soil cultivation technologies to enhance corn quality. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 28(1), 19–28. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/1.2024.19> [in Ukrainian].
5. Chernilevskiy, M. S., Biliavskiy, Yu. A., & Kropyvnytskyi, R. B. (2012). Agro-technical requirements and evaluation of soil cultivation quality (2nd ed.). *ZhNAU* [in Ukrainian].
6. Voitiuk, D. H., et al. (2005). *Agricultural machinery: Fundamentals of theory and calculation*. Vyscha Osvita.
7. Sysolin, P. V., Salo, V. M., & Kropivnyi, V. M. (2001). *Agricultural machines: Theoretical fundamentals, design, engineering*. Book 1: Machines for crop production. Urozhai [in Ukrainian].
8. Zaika, P. M. (2002). *Theory of agricultural machines*. Vol. 1, Part 1: Machines and implements for soil cultivation. *Oko* [in Ukrainian].
9. Yermakov, S. V., et al. (2023). Development and rationale for pneumatic vibration rippers application on plough bodies. *Bulletin of Sumy National Agrarian University, Series "Mechanization and Automation of Production Processes"*, 3(53), 26–31 [in Ukrainian].
10. Plowing aggregate (Patent No. 121013). (2020). Ukrainian Patent Office. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=262849> [in Ukrainian].
11. Kutkovetska, T. O. (2021). Analysis of methods and means to reduce the load on the plowshare board of the moldboard plow. In *Proceedings of the VII International Conference on Innovative Technologies in Cultivation, Storage and Processing of Horticulture and Crop Production* (pp. 53–55). Uman [in Ukrainian].
12. Plow body (Patent No. 662032). (1979). Ukrainian Patent Office. *Bulletin No. 18* [in Ukrainian].
13. Plow body (Patent No. 1160945). (1985). Ukrainian Patent Office. *Bulletin No. 22* [in Ukrainian].
14. Kurka, V. P., et al. (2018). Development of plow designs in the XVIII–XXI centuries. *NUBiP Ukraine, CP "Komprint"* [in Ukrainian].
15. Nadykto, V. T. (2020). Testing of a plow with Tekron moldboards (Research Report). TDATU [in Ukrainian].
16. Bendera, I. M., et al. (2011). Design of agricultural machinery: A handbook for course projects in agricultural engineering for specialists in the field 6.100202 "Processes, machines, and equipment of agro-industrial production." FOP Sysyn O.V. [in Ukrainian].
17. Smolinskyi, S., Smolinska, A., & Marchenko, V. (2017). The plow body determines the effectiveness of plowing. *Agroexpert*, (1). <https://agroexpert.ua/korpus-pluha-vyznachaie-efektyvnist-oranky> [in Ukrainian].
18. Dubovyk, V. P., & Yuryk, I. I. (2006). *Higher mathematics: Textbook*. A.S.K. [in Ukrainian].

Yuri Machok, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Artemenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Amosov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Justification of the Device to Reduce the Traction Resistance of the Plow

Plowing remains an important process in agrotechnology, but also one of the most energy -intensive ones. The analysis of plow structures and research aimed at reducing the traction resistance of the arable unit, showed that a solution that could not provide a significant reduction in traction resistance with minimal operating costs has been proposed today. A promising direction for further improvement of the plow of the plow is the maximum reduction of friction of its five on the wall of the furrow.

Purpose: reducing the traction resistance of the plow housing for basic tillage by justifying its structural parameters.

A mathematical model has been developed for the theoretical determination of the basic parameters of the device to reduce the traction resistance of the plow body and the dependencies that affect the process of its operation and the specific force of pressure of the roller on the wall of the furrow are established. The graphic dependencies obtained are important for practical use.

It is proposed to install on the bracket in the back of the field board of the plow of the plow of the active element of rolling in the form of a barrel -shaped roller, which, rotating in the horizontal plane, provides contact with the furrow with it only in the zone of the maximum radius In the friction of rolling, and reduces the traction resistance of the plow body during plowing. The construction of the bracket and the roller itself contributes to its self -cleaning and elimination of moist soil on its working surface.

Based on the known soil and climatic conditions, the depth of plowing, the width of the grip of the plow and the force acting on the field board, you can determine the rational diameter of the roller. This will convert sliding into rolling friction and increase the reliability and reduce the energy consumption of the plowing process.

plow housing, field board, load on the body, active element of the field board, reduction of traction resistance, reduction of friction forces

Одержано (Received) 17.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

УДК 631.358.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.167-178](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.167-178)

Г. В. Теслюк, доц., канд. техн. наук, В. В. Головченко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: super-shm@ukr.net

Аналіз конструктивних особливостей машин для очищення насіння рицини

У статті проведено аналіз сучасного стану розвитку технологій очищення насіння рицини та виявлено основні недоліки існуючих рішень. Встановлено, що традиційні методи лушення, засновані на механічному впливі (тертя, стиснення, удар), мають низьку ефективність, призводять до значного пошкодження насіння та потребують удосконалення для підвищення якості очищення. Проведено класифікації принципів схем будови робочих зон машин для розлушування плоду та відокремлення насіння рицини та машин для очищення насінневої суміші. Встановлено, що під час технологічних операцій розлушування плоду і відокремлення насіння рицини утворюється суміш, яка містить три основні компоненти: нерозлушені або частково розлушені плоди (великі важкі компоненти), насіння рицини (середні компоненти) і лушпиння (маленькі легкі компоненти). У цьому випадку найкраще використовувати аеродинамічну сепарацію суміші з елементами решітного сепаратора. З урахуванням цього складено технологічну схему машини для очищення насіння рицини, основними робочими органами якої є нерухома гумова дека, рухомий вертикальний конусоподібний гумовий валок, решето і циклонний сепаратор. Надалі передбачено розробку конструкції машини для очищення насіння рицини на базі розробленої технологічної схеми, обґрунтування її конструктивно-технологічних параметрів, виготовлення і впровадження у виробництво.

рицина, насіння, плід, лушпиння, насіннева суміш, лушення, очищення, сепарація, технологічна схема, машина

Постановка проблеми. Згідно з останніми директивами щодо біоекономіки, виданими Європейським Союзом, промисловий сектор повинен більше покладатися на матеріали біологічного походження замість традиційних нафтових ресурсів [1–2], а аграрний сектор може сприяти досягненню цієї мети шляхом покращення використання продуктів переробки олійних культур [3]. Однак вирощування технічних культур викликає занепокоєння щодо використання земель і, як наслідок, конкуренції між продовольчими та непродовольчими культурами [4]. Можливість вирощування технічних культур на малопродуктивних землях може стати найкращим компромісом для досягнення майбутніх енергетичних цілей ЄС без скорочення земель, доступних для виробництва продовольства [5]. Таким чином, варто досліджувати ланцюги створення доданої вартості культур із низькими вимогами до ресурсів, щоб вирішити поточні проблеми для їх масштабного впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рицина (*Ricinus communis L.*) є перспективною непродовольчою культурою [6–7], яку можна вирощувати в умовах низького рівня ресурсного забезпечення в Україні, досягаючи врожайності насіння 1,6–1,8 т/га (сорт Олеся), 1,7–2,1 т/га (сорт Хортичанка), 1,5–1,7 т/га (сорт Хортицька 3) [8]. Крім того, рицинову олію можна використовувати для різних цілей, таких як виробництво біодизеля, косметики, фармацевтичних препаратів, фарб, лаків, мастил для двотактних двигунів або компонентів напівжорсткої піни для термоізоляції [9–12]. Її внесок у зменшення залежності ЄС і України від імпорту рослинної олії для промислових і енергетичних цілей може бути відчутним, якщо буде належним чином розвинуто ефективний внутрішній ланцюг постачання рицинової олії.

Ricinus communis L. відомий багатьма дикими та напівкультурними типами, які відрізняються генетичними та фенотипічними характеристиками, досягаючи висоти,

подібної до середнього дерева [13]. У рицини насіння росте всередині капсул, розташованих на одному або декількох китицях, які розвиваються поступово протягом життя рослини. Внаслідок цього дозрівання насіння на китицях є неоднорідним [14–16]. Це ускладнює механізацію збирання насіння рицини, і на ринку досі бракує спеціалізованих машин. Тому насіння доводиться збирати вручну, що збільшує витрати на виробництво рицинової олії та пов'язаних із нею побічних продуктів. Однак ручне збирання для насінневого матеріалу високих репродукцій є доцільним через невеликі об'єми [17–18]. Тоді виникає технічна задача виділення і очищення насіння рицини з плодів (капсул, коробочок). Узагальнена технологічна схема отримання насіння рицини наведена на рис. 1. Існуюче обладнання для обрушення, шеретування, очищення насіння інших культур [19–22] не можна використовувати через високу ймовірність травмування насіння рицини. Це пов'язано із відмінністю реологічних властивостей насіння рицини від інших культур [23–24].

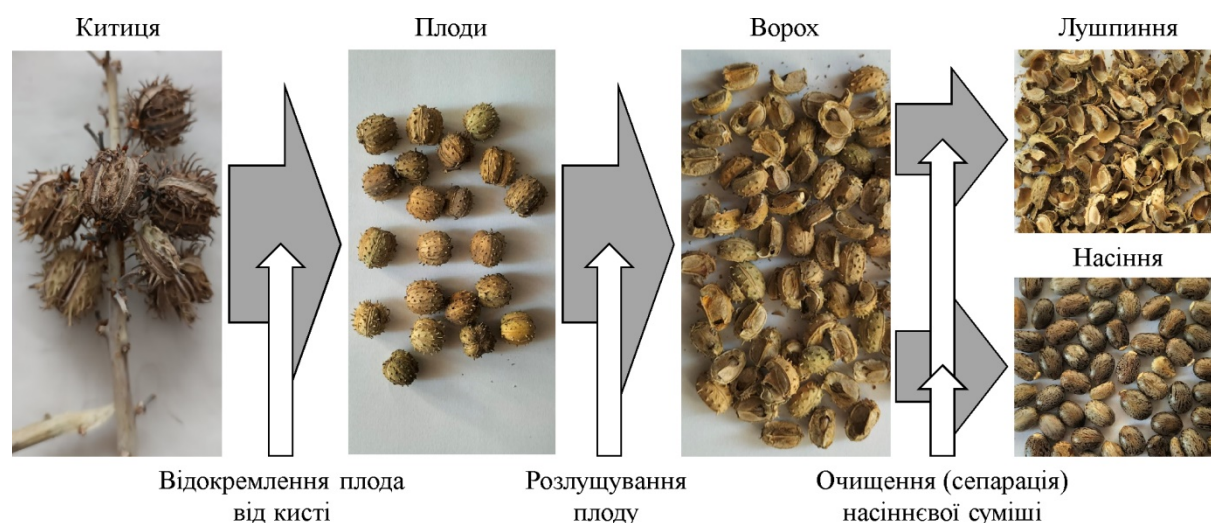


Рисунок 1 – Технологічні операції отримання насіння рицини

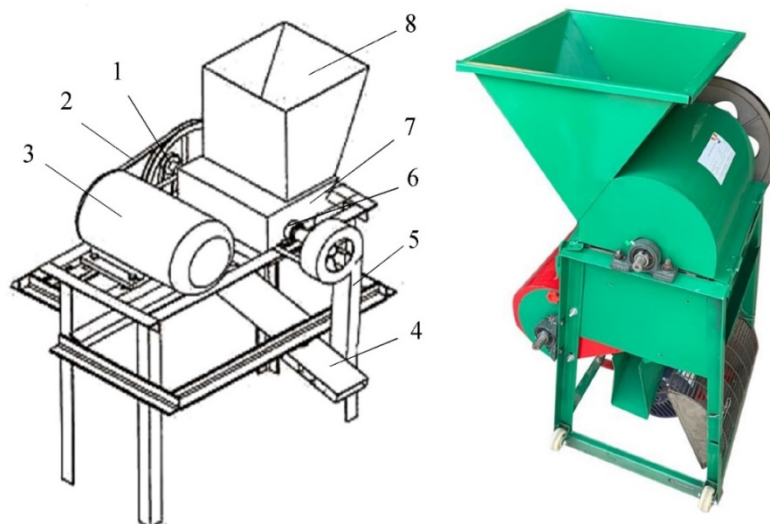
Джерело: розроблено авторами

Постановка завдання. Метою досліджень є проведення патентно-інформаційного аналізу і обґрунтування технологічної схеми машини для очищення насіння рицини.

Виклад основного матеріалу. Проведено патентно-інформаційний аналіз існуючих машин для виконання технологічної операції розлушування плоду і відокремлення насіння рицини.

В роботі [25] проведено оцінювання продуктивності локально розробленої машини для лущення плодів та відокремлення насіння рицини (рис. 2). Розробка машини була здійснена з метою зменшення трудомісткості, пов'язаної з переробкою рицинової олії. Машина складається з двох основних відсіків: блоку відокремлення та блоку лущення. Основним робочим органом блоку лущення є горизонтальний рифлений барабан. Недоліками наведеної машини є низька ефективність очищення, яка становить близько 48,7 %, що призводить до необхідності додаткового очищення насіння. Ефективність відокремлення та рівень вилучення насіння знижуються при збільшенні швидкості барабана, що обмежує продуктивність машини при роботі з великими обсягами сировини. Вищі швидкості також сприяють зростанню відсотка втрат насіння (0,98 % при 400 об/хв проти 0,50 % при 240 об/хв) і підвищують ризик механічного пошкодження насіння, що може впливати на його якість. Система

повітряного очищення недостатньо ефективна, тому потрібно вдосконалення системи аспірації. Машина працює краще з великим насінням рицини, тоді як дрібне насіння має більший відсоток невидаленого лушпиння, що потребує додаткових налаштувань. Крім того, через інтенсивне механічне навантаження на барабан, шків, ремені та інші рухомі частини можливе їх швидке зношування, що вимагатиме регулярного технічного обслуговування. Для підвищення ефективності роботи машини слід вдосконалити систему очищення, покращити налаштування для різних розмірів насіння та оптимізувати швидкісний режим для досягнення балансу між продуктивністю та якістю обробки.



1 – привідний шків; 2 – клиновий ремень; 3 – електродвигун; 4 – випускний жолоб; 5 – корпус вентилятора; 6 – корпус підшипника; 7 – блок лушення та відокремлення; 8 – завантажувальний бункер

Рисунок 2 – Машина для лушення плодів та відокремлення насіння рицини

Джерело: [25]

Роботи [26–27] охоплюють проектування, виготовлення та оцінку ефективності роботи машини для лушення насіння рицини. Машина була спроектована з загальною потребою в потужності 2,6 кВт і призначена для лушення вибраних сортів насіння рицини, що робить її придатною для малих і середніх виробників насіння рицини. Конструкція машини включає завантажувальний бункер, лушильний циліндр, решітчасту деку, підшипники, очищувальний блок, шків, вихід для насіння, вал і раму (рис. 3). Основними недоліками машини для лушення насіння рицини є її обмежена продуктивність, яка становить лише 12,19 кг/год, що може бути недостатнім для великих фермерських господарств або промислового використання. Високий рівень механічного пошкодження насіння (6,04%) може впливати на його подальше використання, особливо якщо насіння призначене для висадки або переробки в масло. Втрати насіння також є суттєвою проблемою, оскільки 2,89% насіння розсіюється або втрачається під час роботи машини, що знижує загальну ефективність процесу. Хоча машина виготовлена з локально доступних матеріалів, їх довговічність та зносостійкість можуть бути нижчими, ніж у промислових аналогів. Також вона має обмежену гнучкість у налаштуваннях, оскільки працює найкраще лише при конкретних параметрах (швидкість циліндра 220 об/хв, зазор 15 мм), що може бути неефективним для різних сортів насіння рицини з іншими характеристиками. Крім того, можливий високий рівень енергоспоживання, оскільки потужність машини становить 2,6 кВт, що

може бути витратним при тривалому використанні, особливо в регіонах із нестабільним електропостачанням.

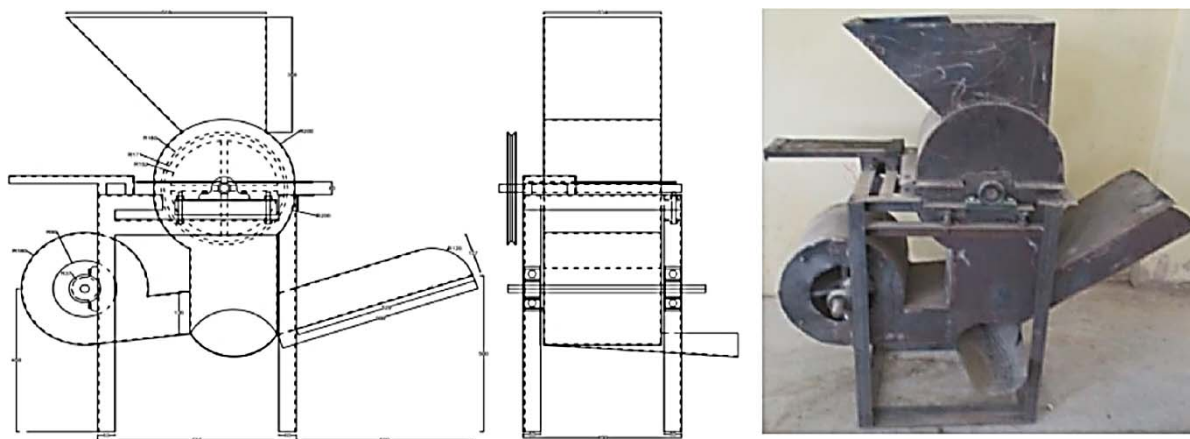


Рисунок 3 – Машина для лушення насіння рицини

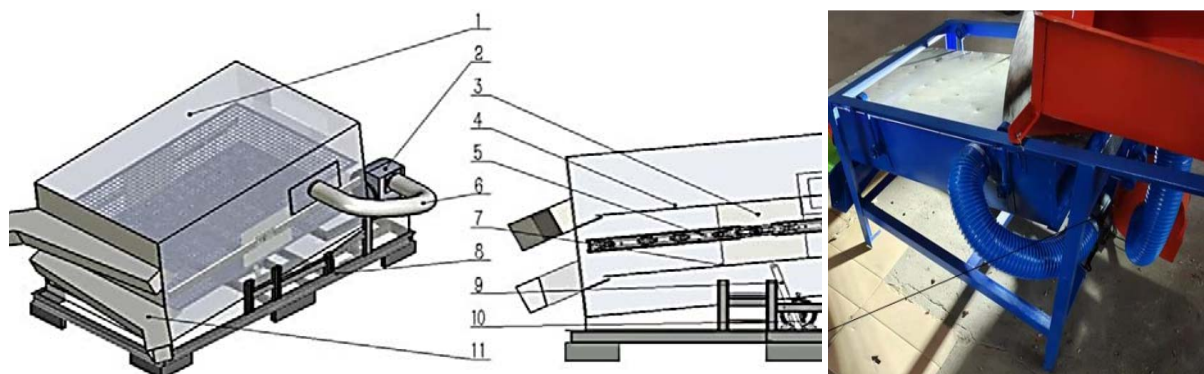
Джерело: [26-27]

В роботі [28] була спроектована та виготовлена валкова луцильна машина для насіння рицини типу CSSM-1, враховуючи всі активні частини з точки зору міцності та жорсткості. У цій роботі машина була модернізована до версії CSSM-2 для усунення всіх недоліків CSSM-1. Конструкція та характеристики були розроблені з урахуванням використання дрібного насіння рицини. Недоліки CSSM-1 полягали в недостатній ефективності лушення, очищення та сепарації, що вимагало модифікації конструкції. Механізм не був достатньо портативним і важким через більші розміри, а також були проблеми з надійністю і жорсткістю деяких компонентів. Висока маса та габарити обмежували можливості транспортування та експлуатації машини в різних умовах. Крім того, існувала необхідність у покращенні розподілу навантажень на вал і механізми, що могли б спричинити знос і поломки при інтенсивній роботі.

З метою поліпшення очисного ефекту луцильної суміші рицини в роботі [29] був розроблений повітряно-ситоподібний пристрій для очищення рицини (рис. 4). Він складається з області для очищення, вібраційного сита, випускного отвору, вентилятора, кривошипно-шатунного механізму, двигуна та рами. Основні недоліки пристрою для очищення насіння рицини включають обмеження у роботі з великими об'ємами матеріалу, складність налаштування оптимальних параметрів для різних умов та можливість забивання матеріалом, незважаючи на вдосконалення конструкції. Крім того, ефективність може змінюватися залежно від розміру отворів сита, що вимагає ретельного калібрування для мінімізації втрат насіння. Різноманітність в налаштуваннях повітряного потоку і вібрації може також впливати на якість очищення при різних умовах експлуатації.

Ряд патентів України на корисну модель [30–32] свідчать про деякий розвиток вітчизняної інженерної ідеї в напрямку розробки машини для попереднього очищення насіння рицини. Машина для попереднього очищення насіння рицини (рис. 5) складається з рами, бункера-живильника з регульованою заслінкою, лотка-живильника, барабана-решета, струшувача решета, пристрою для зниження витрат, очищувальної щітки, напрямних і конвеєрно-роторного решета. У лотку-живильнику на підшипникових опорах розташована пара прогумованих валків із можливістю регулювання зазору між ними. Ці валки обертаються в протилежних напрямках і мають різну кутову швидкість. Під ними встановлено пальцеві розпушувачі, що обертаються у

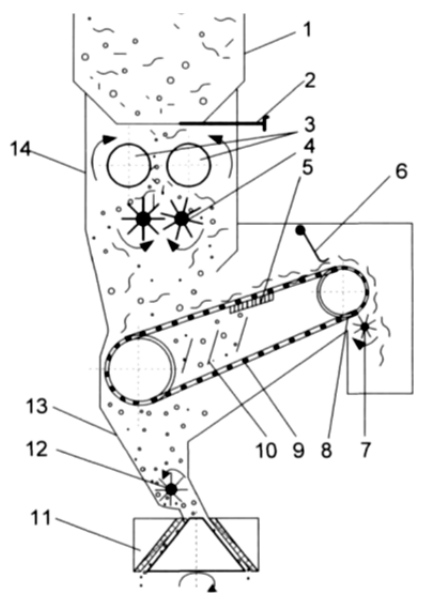
зворотному напрямку відносно валків. В патентах зазначений технічний результат, як підвищення ефективності післяжнивної обробки і сепарації насіння рицини. Однак при цьому у виробництво дана розробка не потрапила. Також відсутня інформація щодо експериментальних досліджень процесу роботи цього обладнання.



1 – очищувальна кімната; 2 – вентилятор; 3 – вертикальні пластини; 4 – верхнє вібруюче сито; 5 – похила площина; 6 – канал; 7 – нижнє вібруюче сито; 8 – каркас; 9 – механізм кривошипно-колінчатий; 10 – двигун; 11 – вихідний отвір

Рисунок 4 – Повітряно-ситоподібний пристрій для очищення рицини

Джерело: [29]



1 – живильник; 2 – регульована заслінка; 3 – прорезинені валки; 4 – пальцеві розрихлювачі; 5 – струшувач решета; 6 – витратознижуючий пристрій для обмеження висоти шару вороху; 7 – очищувача щітка; 8 – приводний барабан; 9 – конвеєрне решето; 10 – направляючі вороху; 11 – вальце-дековий очищувач; 12 – дозуючий пристрій; 13 – вивантажувальний лоток; 14 – лоток-живильник

Рисунок 5 – Машина для попереднього очищення насіння рицини

Джерело: [30–32]

Узагальнюючи проведений аналіз машин для розлушування плоду та відокремлення насіння складено принципові схеми будови робочих зон кожної групи машин (рис. 6).

До першої групи належать машини, у яких плід піддається луценню під дією тертя та зусиль стиснення між торцевими поверхнями двох дисків з абразиву або між

нерухомою декою та валком, що обертається. Зазначені машини відрізняються траєкторію руху плодів під час луцення та в часі впливу зусиль на них. Найпоширенішими є луцильні постави з нижнім бігуном, які мають вертикальну вісь, на якій обертається абразивний диск (бігун), тоді як верхній диск, паралельний нижньому, залишається нерухомим. Матеріал подається через отвір диску, який розташований зверху, та переміщується по спіралеподібній кривій і відходить у випускний патрубок за допомогою лопаток, прикріплених до диска. Сили, що діють при цьому способі механічного впливу на плід зводяться до стиснення та тертя кочення з ковзанням. Відносно переміщення плоду в міждисківому просторі постави забезпечується відцентровою силою. До цієї ж групи належать і вальцедеккові верстати, в яких плід піддається луценню між обертовим (піщаниковим) барабаном і нерухомо закріпленою декою, що прилягає до робочого валка з жорсткою або еластичною поверхнею. Плід, потрапляючи у робочу зону, поступово звужується від місця прийому до виходу, піддається дії комплексу зусиль – стиснення та тертя. При цьому час впливу на кожний плід менший порівняно з часом впливу в луцильних машинах, а траєкторія руху плоду наближена до частини кола.

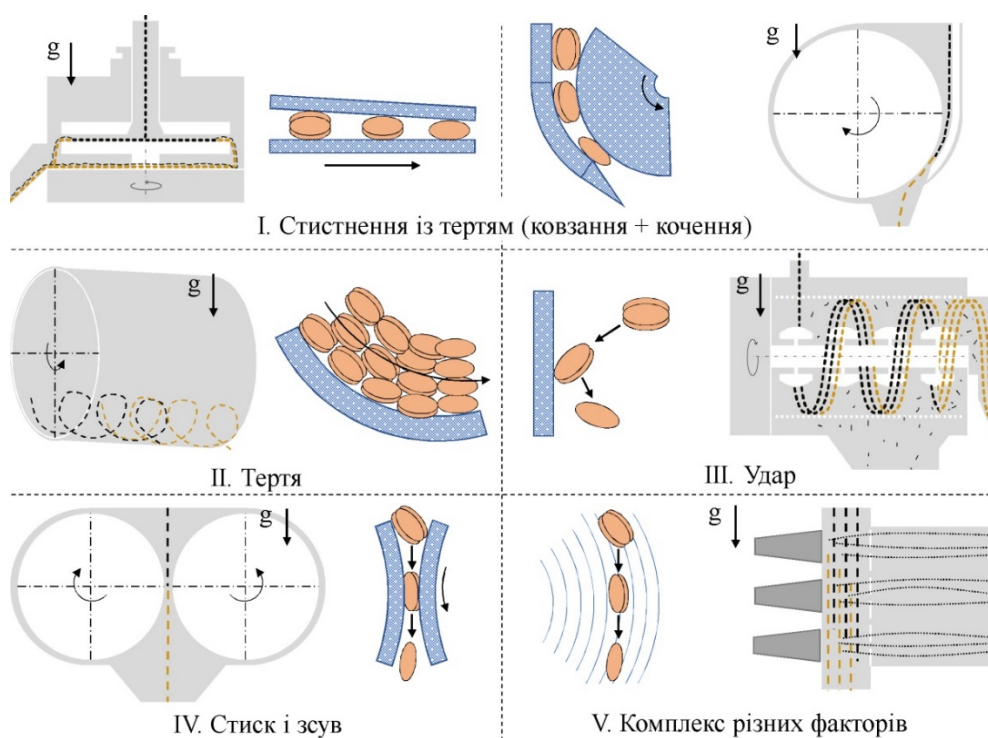


Рисунок 6 – Класифікація принципів схем будови робочих зон машин для розлушування плоду та відокремлення насіння

Джерело: розроблено авторами

До другої групи належать машини, у яких луцення відбувається за рахунок тривалого впливу сил тертя між плодами, та їх тертя об робочу поверхню дисків з абразиву і обичайку з перфораціями. Унаслідок інтенсивного мікрощування зовнішніх оболонок відбувається їх відділення. Для цього різновиду луцильно-шліфувальних машин характерним є обов'язкове заповнення робочої зони плодами. Лише за цієї умови створюються передумови для повного прояву сил тертя, що забезпечує ефективне видалення оболонок. Найпоширенішими є машини з горизонтальним розташуванням осі робочого вала. Плід шліфується на поверхні

робочого органу і по досягненню оболонки необхідної товщини відбувається лушення. Траєкторія руху плоду в робочій зоні цієї машини має вигляд гвинтової лінії.

До третьої групи належать машини, у яких плід лушиться під дією багаторазових ударів та інерційних сил. Це досягається за допомогою обертових бичів (лопатеї), які відкидають насіння на тверду поверхню, внаслідок чого відбувається руйнування та відділення оболонок. Також плід може прискорюватися обертovим диском і вдарятися об нерухому кільцеву обичайку. До цього типу машин належать обоєчні машини, центробіжні лушильники, бичові машини тощо.

До четвертої групи входять машини, у яких лушення плода відбувається виключно внаслідок дії сил зсуву та стиснення. Використовують пару гумованих валків, що встановлені із зазначеним зазором і таких, що обертаються назустріч один одному із різною швидкістю. До обладнання цього типу належать різні конструкції лушильних машин із гумованими валками.

П'ята група машин відрізняється тим, що лушення плода відбувається під дією повітряного струменя, який створює комплекс різноманітних факторів, таких як перепади тиску, різниця швидкостей, дотичні сили та стрибки ущільнення. Ці явища виникають при обтіканні продукту високошвидкісним (звуковим або надзвуковим) потоком повітря. До цієї групи належать аеролушильні установки різних типів, які не мають рухомих робочих органів.

Узагальнюючи проведений аналіз машин для очищення насінневої суміші складено чотири групи їх принципovих схем (рис. 7).

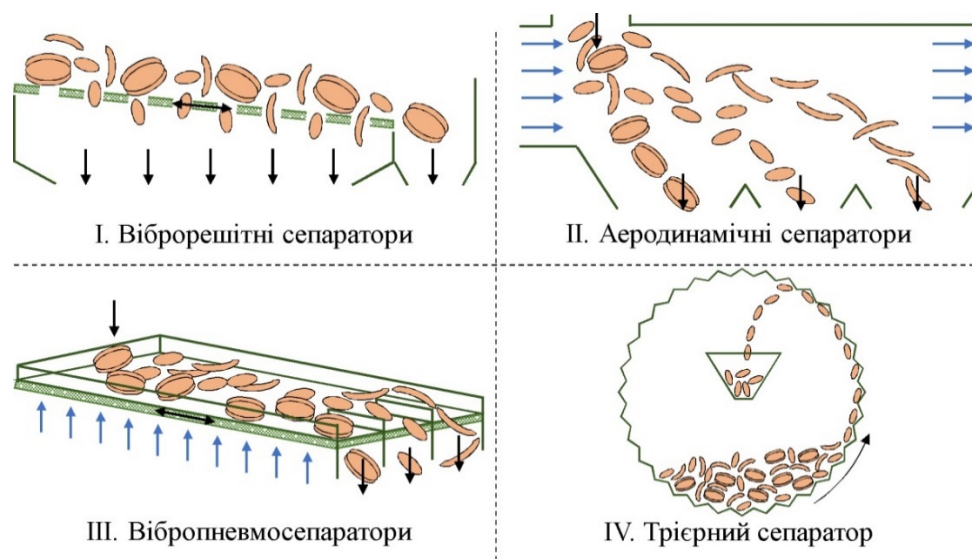


Рисунок 7 – Класифікація принципovих схем машин для очищення насінневої суміші

Джерело: розроблено авторами

Віброрешітні сепаратори працюють на основі механічного розділення компонентів суміші за розмірами. Насіннева суміш подається на набори сит (решіт), які здійснюють коливальні рухи (вібрацію). Через отвори решіт проходять дрібні домішки (прохід), а великі залишаються зверху (схід). Процес може відбуватися в кілька етапів: перше сито видаляє великі домішки, наступні решета сортують насіння за розміром, у результаті отримують очищене насіння, розділене за фракціями. Основними перевагами такого сепаратора є висока продуктивність, простота конструкції та експлуатації, ефективне відсіювання механічних домішок.

Аеродинамічні сепаратори використовують потік повітря для розділення компонентів суміші за масою. Насіннева суміш подається в повітряний канал, де діє

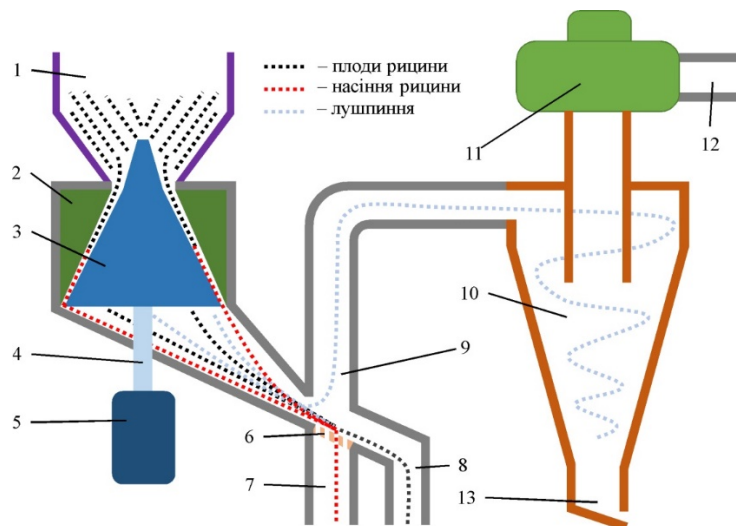
спрямований потік повітря: легкі домішки (лушпиння, пил) виносяться потоком в окрему камеру, важче насіння падає вниз і збирається в бункері, а деякі моделі мають багатоступеневі канали для точнішого розділення. До основних переваг таких сепараторів належить видалення пилу та дрібних органічних залишків, очищення насіння без механічних пошкоджень і висока ефективність при роботі з дрібним та легким насінням.

Вібропневмосепаратори поєднують механічне (вібраційне) та аеродинамічне очищення. Насіннева суміш переміщується на віброуючій поверхні у вигляді сітки, через яку поступає потік повітря. При цьому створюється псевдозріджений шар суміші. Суміш починає розділятися на компоненти за комплексом характеристик (маса, коефіцієнт тертя, аеродинамічні властивості). Основними перевагами таких сепараторів є поєднання двох ефективних методів очищення, висока якість очищення навіть складних сумішей та можливість регулювання інтенсивності вібрації та потоку повітря.

Трієрний сепаратор використовує різницю у формі та довжині насіння для відділення домішок. Насіння подається в обертовий барабан із комірками (трієрами), які захоплюють насіння певного розміру та транспортують його до спеціального жолоба, тоді як довші або коротші частинки залишаються у вихідному потоці та видаляються. Основними перевагами такого методу є висока точність розділення, видалення довгих (недозрілих) та коротких (битих) частинок, а також можливість сортування насіння різних культур.

Враховуючи те, що насіння рицини під час його відокремлення від плоду не повинно травмуватися, найбільш сприятливим способом є лушення плоду внаслідок дії сил стиснення та зсуву. Такої взаємодії можна досягти, використовуючи гумовий валок і нерухому гумову деку.

Під час технологічних операцій розлушування плоду і відокремлення насіння рицини утворюється суміш, яка містить три основні компоненти: нерозлушені або частково розлушені плоди (великі важкі компоненти), насіння рицини (середні компоненти) і лушпиння (маленькі легкі компоненти). У цьому випадку найкраще використовувати аеродинамічну сепарацію суміші із елементами решітного сепаратора. З урахуванням цього складено технологічну схему машини для очищення насіння рицини (рис. 8).



1 – завантажувальний бункер; 2 – нерухома гумова дека; 3 – конусоподібний гумовий валок; 4 – вал; 5 – мотор-редуктор; 6 – решето; 7 – патрубок для насіння; 8 – патрубок для нерозлушених або частково розлушених плодів; 9 – повітропровід; 10 – циклонний сепаратор; 11 – відцентровий вентилятор; 12 – патрубок для пилу; 13 – патрубок для лушпиння

Рисунок 8 – Технологічна схема машини для очищення насіння рицини

Джерело: розроблено авторами

Розроблена машина працює наступним чином: плоди рицини завантажуються у бункер, далі під дією сили тяжіння потрапляють у зазор між нерухомою гумовою декою і конусоподібним гумовим валком, який розміщено вертикально. Обертання валка забезпечує мотор-редуктор. Плоди рицини, проходячи через зазор, що звужується, розлущуються із відокремленням насіння рицини і лушпиння. Сформована насіннева суміш (нерозлущені або частково розлущені плоди, насіння рицини, лушпиння) потрапляє до зони, де встановлено решето. Нерозлущені або частково розлущені плоди сходять з решета і потрапляють у відповідний патрубок. В свою чергу, очищене насіння проходить через решето. Повітряний потік, створюваний відцентровим вентилятором, втягує лушпиння у циклонний сепаратор, де відбувається його накопичення та відділення пилоподібних домішок.

Розроблена машина має низку переваг:

- використання гумових елементів забезпечує делікатне лущення, що мінімізує пошкодження насіння і підвищує якість кінцевого продукту;
- поєднання решітного та аеродинамічного сепарування гарантує ефективне очищення насіння від лушпиння та нерозлущених плодів.

Висновки. В результаті патентно-інформаційного аналізу існуючих машин для виконання технологічної операції розлущування плоду і відокремлення насіння рицини встановлено їх недоліки: травмування очищеного насіння, обмеження у роботі з великими об'ємами матеріалу; складність налаштування оптимальних параметрів для різних умов та можливість забиття матеріалом.

Проведено класифікації принципів схем будови робочих зон машин для розлущування плоду та відокремлення насіння рицини та машин для очищення насінневої суміші.

Встановлено, що під час технологічних операцій розлущування плоду і відокремлення насіння рицини утворюється суміш, яка містить три основні компоненти: нерозлущені або частково розлущені плоди (великі важкі компоненти), насіння рицини (середні компоненти) і лушпиння (маленькі легкі компоненти). У цьому випадку найкраще використовувати аеродинамічну сепарацію суміші із елементами решітного сепаратора. З урахуванням цього складено технологічну схему машини для очищення насіння рицини, основними робочими органами якої є нерухома гумова дека, рухомий вертикальний конусоподібний гумовий валок, решето і циклонний сепаратор. Надалі передбачено розробку конструкції машини для очищення насіння рицини на базі розробленої технологічної схеми, обґрунтування її конструктивно-технологічних параметрів, виготовлення і впровадження у виробництво.

Список літератури

1. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Closing the Loop—An EU Action Plan for the Circular Economy; COM/2015/0614; European Commission: Bruxelles, Belgium, 2015. <http://bastion.wum.edu.pl/wp-content/uploads/2013/09/Europe-2020-Flagship-Initiative-Innovation-Union.pdf>
2. Janiszewska D., Olchowski R., Nowicka A., Zborowska M., Marszałkiewicz K., Shams M., Giannakoudakis D.A., Anastopoulos I., Barczak M. Activated biochars derived from wood biomass liquefaction residues for effective removal of hazardous hexavalent chromium from aquatic environments. *GCB Bioenergy*. 2021. 13: 1247–1259. DOI: 10.1111/gcbb.12839
3. Park K., Sanjaya S.A., Quach T., Cahoon E.B. Toward sustainable production of value-added bioenergy and industrial oils in oilseed and biomass feedstocks. *GCB Bioenergy*. 2021. 13: 1610–1623. DOI: 10.1111/gcbb.12883
4. Gelfand I., Sahajpal R., Zhang X., Izaurralde R.C., Gross K.L., Robertson G.P. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*. 2013. 493: 514–517. DOI: 10.1038/nature11811

5. Von Cossel M., Lewandowski I., Elbersen B., Staritsky I., Van Eupen M., Iqbal Y., Mantel S., Scordia D., Testa G., Cosentino S.L. Marginal Agricultural Land Low-Input Systems for Biomass Production. *Energies*. 2019. 12: 3123. DOI: 10.3390/en12163123
6. Zanetti F., Monti A., Berti M.T. Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review. *Ind. Crops Prod.* 2013. 50: 580–595. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.08.030
7. Alexopoulou E., Papatheohari Y., Zanetti F., Tsiotas K., Papamichael I., Christou M., Namatov I., Monti A. Comparative studies on several castor (*Ricinus communis* L.) hybrids: Growth, yields, seed oil and biomass characterization. *Ind. Crops Prod.* 2015. 75: 8–13. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.015
8. Ведмедева К.В., Кавязіна М.Ю., Махова Т.В. Оцінка зразків рицини за господарсько – цінними ознаками. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 2018. 26: 39-48. https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Vedmedeva2_26.pdf
9. Carrino L., Visconti D., Fiorentino N., Fagnano M. Biofuel Production with Castor Bean: A Win–Win Strategy for Marginal Land. *Agronomy*. 2020. 10: 1690. DOI: 10.3390/agronomy10111690
10. Bateni H., Karimi K. Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach. *Chem. Eng. Res. Des.* 2016. 107: 4–12. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.08.014
11. Ogunniyi D.S. Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresour. Technol.* 2006. 97: 1086–1091. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.03.028
12. Pędzik M., Janiszewska D., Rogoziński T. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. *Ind. Crops Prod.* 2021. 174: 114162. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114162
13. Anjani K. Castor genetic resources: A primary gene pool for exploitation. *Ind. Crops Prod.* 2012. 35: 1–14. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.06.011
14. Vallejos M., Rondanini D., Wassner D.F. Water relationships of castor bean (*Ricinus communis* L.) seeds related to final seed dry weight and physiological maturity. *Eur. J. Agron.* 2011. 35: 93–101. DOI: 10.1016/j.eja.2011.04.003
15. Koutroubas S.D., Papakosta D.K., Doitsinis A. Adaptation and yielding ability of castor plant (*Ricinus communis* L.) genotypes in a Mediterranean climate. *Eur. J. Agron.* 1999. 11: 227–237. DOI: 10.1016/S1161-0301(99)00034-9
16. Pari L., Latterini F., Stefanoni W. Herbaceous Oil Crops, a Review on Mechanical Harvesting State of the Art. *Agriculture*. 2020. 10: 309. DOI: 10.3390/agriculture10080309
17. Алієв Е.Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 2020. 530 с.
18. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 2019. 196 с. https://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf
19. Петраченко Д.О., Мохер Ю.В., Коропченко С.П. Технологія оброщення насіння промислових конопель для малого бізнесу. *Scientific monograph*. Riga, Latvia: «Baltija Publishing». 2023. 645-671. DOI: 10.30525/978-9934-26-328-6-29
20. Теслюк Г.В. Обґрунтування технологічного процесу, параметрів та режимів роботи машини для виділення насіння гарбуза: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Дніпропетровськ. 2010. 147 с. <https://uacademic.info/ua/document/0410U001669>
21. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О. Технологічне обладнання для виробництва рослинної олії. Електронний навчальний посібник. 2021. https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_29/index.html
22. Шевчук В.В., Сукач О.М. Процеси і засоби для подрібнення насіння олійних культур: монографія. Львів: Львівський національний аграрний університет. 2018. 105 с. https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/558/1/Shevchuk_monograf.pdf
23. Дідур В.В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Мелітополь. 2020. 504 с. http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/dyssertacyja-dydur-vv_.pdf
24. Yang L., Chen H., Xiao J., Fan Y., Song S., Zhang Y., Liu X. Research on Structural–Mechanical Properties during the Castor Episperme Breaking Process. *Processes*. 2021. 9: 1777. DOI: 10.3390/pr9101777
25. Balamı A.A., Adgidzi D., Kenneth C.A., Lamuwa G. Performance Evaluation of a Dehusking and Shelling Machine for Castor Fruits and Seeds. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2012. 2 (10): 44–48. DOI: 10.9790/3021-021014448
26. Yakubu A.U., Muhammad U.S., Isiaka M., Sada A.M., Saleh A. Development of Castor (*Ricinus Communis*) Seeds Shelling Machine. *Nigerian Journal of Engineering*. 2020. 27 (3): 28–34.
27. Yakubu A.U., Muhammad U.S., Ishiaka M., Muhammad S.A., Sale N.A. Development and Performance Evaluation of a Castor Seed (*Ricinus Communis*) Shelling Machine with a Winnowing System. *FUOYE Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET)*. 2020. 5 (1): 2–5. DOI: 10.46792/fuoyejet.v5i1.430

28. Pius C.O., Nnaemeka S.P.O., Charles O., Vincent N.O., Chinenye A.I. Design Enhancement Evaluation of a Castor Seed Shelling Machine. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2014. 3 (7): 924–938. DOI: 10.9734/JSRR/2014/5557
29. Hou J., Liu X., Zhu H., Ma Z., Tang Z., Yu Y., Jin J., Wang W. Design and Motion Process of Air-Sieve Castor Cleaning Device Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023. 13(6): 1130. DOI: 10.3390/agriculture13061130

References

1. *European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Closing the Loop—An EU Action Plan for the Circular Economy*; COM/2015/0614; European Commission: Bruxelles, Belgium, 2015. <http://bastion.wum.edu.pl/wp-content/uploads/2013/09/Europe-2020-Flagship-Initiative-Innovation-Union.pdf>.
2. Janiszewska, D., Olchowski, R., Nowicka, A., Zborowska, M., Marszałkiewicz, K., Shams, M., Giannakoudakis, D.A., Anastopoulos, I., Barczak, M. (2021). *Activated biochars derived from wood biomass liquefaction residues for effective removal of hazardous hexavalent chromium from aquatic environments*. *GCB Bioenergy*. 13: 1247–1259. DOI: 10.1111/gcbb.12839.
3. Park, K., Sanjaya, S.A., Quach, T., Cahoon, E.B. (2021). *Toward sustainable production of value-added bioenergy and industrial oils in oilseed and biomass feedstocks*. *GCB Bioenergy*. 13: 1610–1623. DOI: 10.1111/gcbb.12883.
4. Gelfand, I., Sahajpal, R., Zhang, X., Izaurrealde, R.C., Gross, K.L., Robertson, G.P. (2013). *Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest*. *Nature*. 493: 514–517. DOI: 10.1038/nature11811.
5. Von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., Van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., Cosentino, S.L. (2019). *Marginal Agricultural Land Low-Input Systems for Biomass Production*. *Energies*. 12: 3123. DOI: 10.3390/en12163123.
6. Zanetti, F., Monti, A., Berti, M.T. (2013). *Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review*. *Ind. Crops Prod*. 50: 580–595. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.08.030.
7. Alexopoulou, E., Papatheohari, Y., Zanetti, F., Tsiotas, K., Papamichael, I., Christou, M., Namatov, I., Monti, A. (2015). *Comparative studies on several castor (*Ricinus communis L.*) hybrids: Growth, yields, seed oil and biomass characterization*. *Ind. Crops Prod*. 75: 8–13. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.015.
8. Vedmedeva, K.V., Kavyazina, M.Yu., Makhov, T.V. (2018). *Otsinka zrazkiv rytsyny za hospodars'ko – tsinnymy oznakamy [Evaluation of castor oilseed samples by economic and valuable characteristics]*. Scientific and technical bulletin of the Institute of Oilseeds of the NAAS. 26: 39-48. https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Vedmedeva2_26.pdf [in Ukrainian].
9. Carrino, L., Visconti, D., Fiorentino, N., Fagnano, M. (2020). *Biofuel Production with Castor Bean: A Win-Win Strategy for Marginal Land*. *Agronomy*. 10: 1690. DOI: 10.3390/agronomy10111690.
10. Bateni, H., Karimi, K. (2016). *Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach*. *Chem. Eng. Res. Des*. 107: 4–12. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.08.014.
11. Ogunniyi, D.S. (2006). *Castor oil: A vital industrial raw material*. *Bioresour. Technol*. 97: 1086–1091. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.03.028.
12. Pędzik, M., Janiszewska, D., Rogoziński, T. (2021). *Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review*. *Ind. Crops Prod*. 174: 114162. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114162.
13. Anjani, K. (2012). *Castor genetic resources: A primary gene pool for exploitation*. *Ind. Crops Prod*. 35: 1–14. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.06.011.
14. Vallejos, M., Rondanini, D., Wassner, D.F. (2011). *Water relationships of castor bean (*Ricinus communis L.*) seeds related to final seed dry weight and physiological maturity*. *Eur. J. Agron*. 35: 93–101. DOI: 10.1016/j.eja.2011.04.003.
15. Koutroubas, S.D., Papakosta, D.K., Doitsinis, A. (1999). *Adaptation and yielding ability of castor plant (*Ricinus communis L.*) genotypes in a Mediterranean climate*. *Eur. J. Agron*. 11: 227–237. DOI: 10.1016/S1161-0301(99)00034-9.
16. Pari, L., Latterini, F., Stefanoni, W. (2020). *Herbaceous Oil Crops, a Review on Mechanical Harvesting State of the Art*. *Agriculture*. 10: 309. DOI: 10.3390/agriculture10080309.
17. Aliiev, E.B. (2020). *Mekhaniko-tehnolohichni osnovy protsesu pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku [Mechanical and technological foundations of the process of precision separation of sunflower seed material]*: dissertation ... Dr. Tech. Sciences: 05.05.11. Zaporizhzhia. 530 p. [in Ukrainian].
18. Aliiev, E.B. (2019). *Fyzyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [Physical and mathematical models of processes of precision separation of*

- sunflower seed material: monograph*]. Zaporizhzhia: STATUS. 196 p. aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf [in Ukrainian].
19. Petrachenko, D.O., Moher, Y.V., Koropchenko, S.P. (2023). *Tekhnolohiya obrushennya nasinnya promyslovykh konopel' dlya maloho biznesu [Technology of crushing industrial hemp seeds for small businesses. Scientific monograph]*. Riga, Latvia: «Baltija Publishing». 645-671. DOI: 10.30525/978-9934-26-328-6-29 [in Ukrainian].
 20. Teslyuk, G.V. (2010). *Obgruntuvannya tekhnolohichnoho protsesu, parametriv ta rezhymiv roboty mashyny dlya vydilennya nasinnya harbuza [Justification of the technological process, parameters and operating modes of the machine for extracting pumpkin seeds]: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.05.11. Dnipropetrovsk. 147 p.. <https://uacademic.info/ua/document/0410U001669> [in Ukrainian]*.
 21. Samoychuk, K.O., Palyanychka, N.O., Verkholtantseva, V.O. (2021). *Tekhnolohichne obladnannya dlya vyrobnytstva roslynnoyi oliyi [Technological equipment for the production of vegetable oil. Electronic textbook]*. https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_29/index.html [in Ukrainian].
 22. Shevchuk, V.V., Sukach, O.M. (2018). *Processes and means for grinding oilseeds: monograph*. Lviv: Lviv National Agrarian University. 105 p. https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/558/1/Shevchuk_monograf.pdf [in Ukrainian].
 23. Didur, V.V. (2020). *Mechanical and technological foundations of deep processing of castor seeds in the conditions of a small-scale enterprise: dissertation ... Dr. Tech. Sciences: 05.05.11. Melitopol. 504 p. http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/dyssertacyja-dydur-vv_.pdf [in Ukrainian]*.
 24. Yang, L., Chen, H., Xiao, J., Fan, Y., Song, S., Zhang, Y., Liu, X. (2021). *Research on Structural–Mechanical Properties during the Castor Episperme Breaking Process*. *Processes*. 9: 1777. DOI: 10.3390/pr9101777.
 25. Balam, A.A., Adigidi, D., Kenneth, C.A., Lamuwa, G. (2012). *Performance Evaluation of a Dehusking and Shelling Machine for Castor Fruits and Seeds*. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2 (10): 44–48. DOI: 10.9790/3021-021014448.
 26. Yakubu, A.U., Muhammad, U.S., Isiaka, M., Sada, A.M., Saleh, A. (2020). *Development of Castor (Ricinus Communis) Seeds Shelling Machine*. *Nigerian Journal of Engineering*. 27 (3): 28–34.
 27. Yakubu, A.U., Muhammad, U.S., Ishiaka, M., Muhammmad, S.A., Sale, N.A. (2020). *Development and Performance Evaluation of a Castor Seed (Ricinus Communis) Shelling Machine with a Winnowing System*. *FUOYE Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET)*. 5 (1): 2–5. DOI: 10.46792/fuoyejet.v5i1.430.
 28. Pius, C.O., Nnaemeka, S.P.O., Charles, O., Vincent, N.O., Chinenye, A.I. (2014). *Design Enhancement Evaluation of a Castor Seed Shelling Machine*. *Journal of Scientific Research and Reports*. 3 (7): 924–938. DOI: 10.9734/JSRR/2014/5557.
 29. Hou, J., Liu, X., Zhu, H., Ma, Z., Tang, Z., Yu, Y., Jin, J., Wang, W. (2023). *Design and Motion Process of Air-Sieve Castor Cleaning Device Based on Discrete Element Method*. *Agriculture*. 13(6): 1130. DOI: 10.3390/agriculture13061130.

Hennadii Tesliuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Golovchenko**

Dnipro state agrarian and economic university, Dnipro, Ukraine

Development of Mechatronic Systems for Targeted Separation and Selection of Seed Material

The article analyzes the current state of development of castor seed cleaning technologies and identifies the main drawbacks of existing solutions. It has been established that traditional hulling methods based on mechanical impact (friction, compression, impact) have low efficiency, cause significant seed damage, and require improvement to enhance cleaning quality. A classification of the fundamental structural schemes of working zones in machines for hulling castor fruits, separating castor seeds, and cleaning seed mixtures has been conducted. It has been determined that during the technological operations of hulling castor fruits and separating seeds, a mixture is formed that consists of three main components: unhulled or partially hulled fruits (large heavy components), castor seeds (medium components), and husks (small light components). In this case, the best approach is to use aerodynamic separation of the mixture combined with elements of a sieving separator. Based on this, a technological scheme for a castor seed cleaning machine has been developed, with the main working elements being a stationary rubber deck, a movable vertical conical rubber roller, a sieve, and a cyclone separator. Further work includes the development of the machine's design based on the proposed technological scheme, justification of its structural and technological parameters, manufacturing, and implementation in production.

castor oil, seeds, fruit, husk, seed mixture, peeling, cleaning, separation, technological scheme, machine

Одержано (Received) 05.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, **А. М. Красота, М. В. Красота**, доц. канд. техн. наук
Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kntucpfzk@gmail.com

Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям

В статті за допомогою моделювання виконані дослідження закономірностей змін параметрів напружено-деформованого стану на робочій поверхні кулачка розподільного валу ДВЗ. При побудові моделі враховані конструктивні особливості розподільного валу, умови роботи з'єднання «кулачок – штовхач», сили, що діють в газорозподільному механізмі в момент відкриття клапана. Для адекватного відтворення навантажень в деталях досліджуваного вузла створена скінчено-елементна модель розподільного валу, який контактує опорними шийками з втулками, а кулачком – з одним із штовхачів. Результати розрахунків підтвердили, що саме в зоні контакту «кулачок – штовхач» спостерігаються максимальні значення напружень. Для визначення шляхів покращення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь кулачків дослідженні параметри напружено-деформованого стану базового кулачка, а також кулачка з антифрикційним покриттям, нанесеним фінішною антифрикційною безабразивною обробкою. Якісний та кількісний аналіз напружень в зоні контакту «кулачок – штовхач» дозволив встановити, що розподільний вал з кулачком, що має антифрикційне покриття, сприймає менші силові напруження ніж з кулачком базового виконання, а отже, буде піддаватися меншому зношуванню. Отримані закономірності дозволяють стверджувати про доцільність ФАБО кулачків з метою підвищення довговічності розподільного валу.

розподільний вал, газорозподільний механізм, з'єднання «кулачок – штовхач», скінчено-елементна модель, напружено-деформований стан, зносостійкість, антифрикційне покриття

Постановка проблеми. Одним із напрямків підвищення надійності двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) є удосконалення обробки робочих поверхонь найбільш відповідальних деталей, тобто таких, які лімітують ресурс та довговічність двигуна в цілому та визначають його працездатність [1]. До таких деталей слід віднести: головку блоку і гільзу циліндрів, поршень, шатун, колінчастий і розподільний вали та ін. За рахунок покращення якості робочих поверхонь саме цих деталей можна досягти більш ефективної експлуатації автомобільних і тракторних двигунів.

Серед деталей газорозподільного механізму, що обмежують ресурс ДВЗ, важливе місце займають розподільні вали, які мають відносно низьку надійність через високу інтенсивність зносу робочої поверхні кулачків. Внаслідок зносу кулачків знижується ефективна потужність двигуна, підвищуються ефективна витрата палива, а також значно погіршуються умови роботи деталей циліндро-поршневої групи [2]. Отже, знос кулачків визначає довговічність не тільки розподільних валів, а й всього ДВЗ.

Однак, складність профілю кулачка значно обмежує використання традиційних методів обробки, а також ускладнює відновлення кулачків розподільного валу. Цей факт дозволяє віднести розподільний вал до деталей, які мають низький рівень ремонтнопридатності.

Таким чином, підвищення зносостійкості та довговічності розподільних валів є актуальним завданням, вирішення якого дасть змогу підвищити надійність та ефективність роботи ДВЗ, його економічність та екологічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основною деталлю механізму газорозподілу ДВЗ, що приводить в рух клапани, є розподільний вал [3]. Його

конструкція (рис. 1) характеризується наявністю опорних шийок 1 і 2, цементованих та загартованих СВЧ кулачків 3 складного профілю, посадочного місця під шестерню приводу 4. Розподільний вал має відносно велику довжину при невеликих діаметрах шийки, що відносить його до класу деталей низької жорсткості.

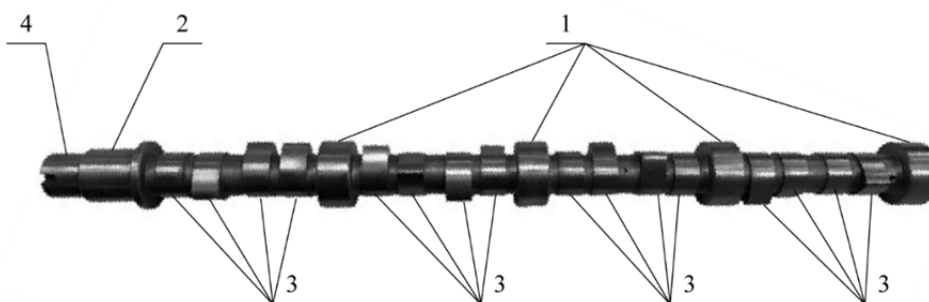


Рисунок 1 – Розподільний вал двигуна КамАЗ: 1 – проміжні опорні шийки; 2 – передня опорна шийка; 3 – впускні та випускні кулачки; 4 – посадочне місце під шестерню

Джерело: розроблено авторами

Розподільний вал розміщується в розвалі блока циліндрів на п'яти опорах. Опорні шийки розподільного валу встановлюються із зазором у втулки, що є підшипниками ковзання. Втулки запресовуються у чавунний блок циліндрів із натягом. Втулки розподільного валу біметалеві, основа їх – сталева, внутрішня сторона втулок має антифрикційний шар [3].

Основними дефектами розподільних валів є знос опорних шийок 1 та кулачків 3. Знос останніх відбувається внаслідок дії зусилля стиску пружин клапанів, яке передається через коромисла, штанги і штовхачі. Зношування впускних та випускних кулачків валу спричиняє порушення фаз газорозподілу та збій у роботі клапанного механізму, що, в результаті, впливає на функціонування всього ДВЗ. Це потребує пошуку шляхів підвищення зносостійкості пари «кулачок – штовхач». Важливість вирішення цього питання пов'язана також з підвищенням інтенсивності роботи ДВЗ за рахунок підвищення частоти обертання колінчастого валу на сучасних двигунах. В цьому випадку на клапан для гасіння інерційних сил встановлюють потужніші пружини, які за малих обертів розподільного валу призводять до зростання контактних напружень у кулачку і штовхачі, що значно погіршує їх зносостійкість [4].

Отже, важливим питанням для виробників двигунів залишається підвищення ефективності функціонування саме цього елемента розподільного валу.

За даними [5], однією з головних проблем при виготовленні та відновленні розподільних валів є їх згин як у процесі обробки, так і після її завершення. Через певний час експлуатації деталі неминуче відбувається деформування деталі, і як наслідок – зниження показників роботи ДВЗ.

На думку авторів [5], визначальною причиною такого дефекту є перерозподіл технологічних остаточних і спадкових напружень заготовки під час видалення припусків і напружень від температурно-силового впливу інструменту, що обробляє. У цьому випадку, напруження, як правило, перерозподіляються нерівномірно. Враховуючи ці обставини, а також те, що якість деталі, що забезпечується механічною обробкою, залежить від технологічної історії [6], особливу увагу заслуговують дослідження закономірності розподілу напружено-деформованого стану (НДС) основних елементів розподільного валу, а саме – робочої поверхні кулачка, який має складний профіль (рис. 2).

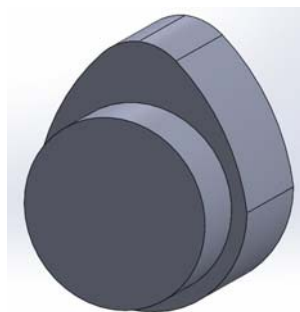


Рисунок 2 – Профіль кулачка розподільного валу ДВЗ

Джерело: розроблено авторами

Дослідженню НДС деталей, що лімітують ресурс роботи ДВЗ, присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних дослідників [7-14 та ін.].

У роботі [7] представлені дослідження НДС поверхні колінчастих валів тепловозів при дискретному зміцненні. Це дозволило обґрунтовано підійти до вибору раціональних параметрів технологічного процесу дискретно-континуального зміцнення високонавантажених деталей машин і механізмів.

Аналізу НДС окремих елементів машин, поверхні яких оброблені із застосуванням прогресивних технологій зміцнення, присвячена робота [8]. Узагальнення отриманих результатів дало можливість встановити виникнення двох типів ефектів впливу на НДС. За результатами дослідження рекомендовані певні розміри зон дискретності при використанні дискретно-континуального зміцнення деталей машин.

Числові розрахунки НДС елементів підшипникового вузла представлені в роботі [8]. Отримані дані свідчать про збільшення максимальних напружень в матеріалі підшипника та вимагають проведення оптимізації геометричної форми робочої поверхні.

Моделювання роботи підшипників розподільного валу ДВЗ виконано в роботі [9]. Побудова скінчено-елементної моделі підшипникового вузла розподільного валу дозволила дослідити закономірності розподілу діючих напружень на поверхні корпусу, а також визначити контактні параметри в підшипнику та контактний тиск в опорі ковзання двигуна.

Дослідженню закономірностей розподілу НДС на робочій поверхні гільзи циліндрів присвячена робота [10]. Авторами доведено наявність на границях контактних ділянок пари «гільза – кільце» піків осьових напружень – розтягуючих та стискаючих. Для зменшення негативного впливу розтягуючих напружень запропоновано нанесення на робочу поверхню гільз антифрикційних покриттів. Отримані закономірності лягли в основу розробки технологічного процесу відновлення гільз циліндрів ДВЗ фінішною антифрикційною безабразивною обробкою (ФАБО) [11].

У роботі [12] за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) вивчено розподіл нормального тиску та сил, що діють на прокладку головки блока циліндрів. Визначення характеристик напружень та деформацій, що діють на досліджуваній елемент, дало змогу вдосконалити конструкцію ущільнення вузла.

На основі МСЕ виконано розрахунки НДС паливного бака ракети-носія, виготовленого з алюмінієвого сплаву [13]. Отримані дані можуть бути використані для проектування нових конструктивних елементів космічних ракет та оцінки їх НДС.

Дослідженню НДС циліндричного з'єднання з м'яким прошарком при осьовому навантаженні під час дифузійного зварювання присвячена робота [14]. За допомогою моделювання встановлено розподіл значень компонентів напружень і пластичних

деформацій. Це дозволило встановити фактори, які необхідно враховувати при виборі матеріалу проміжного шару та режимів дифузійного зварювання.

Представлений огляд робіт свідчить про те, що за допомогою дослідження НДС окремих елементів деталі можливе вирішення ряду технологічних задач. А оскільки, в більшості випадків, руйнування деталі починається з її поверхні, НДС поверхневого шару має суттєвий вплив на експлуатаційні властивості деталей. Механізм формування фізико-механічних показників поверхневого шару пов'язаний з формуванням залишкових напружень [5]. Зазначимо, що серед чисельних методів розрахунку одним із найбільш поширених є МСЕ. Враховуючи ці обставини, а також особливості конструкції кулачка розподільного вала, на наш погляд, заслуговують на увагу проведення досліджень НДС робочої поверхні кулачка розподільного вала ДВЗ з використанням МСЕ.

Постановка завдання. Метою представленої роботи є дослідження закономірностей зміни параметрів НДС в зоні контакту «кулачок – штовхач» газорозподільного механізму двигуна КамАЗ. Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

1. Встановити граничні умови моделювання роботи газорозподільного механізму двигуна КамАЗ та побудувати геометричну, а також скінчено-елементну модель роботи з'єднання «кулачок – штовхач».

2. Виконати моделювання НДС робочої поверхні кулачка розподільного вала.

3. За результатами моделювання запропонувати шляхи покращення експлуатаційних властивостей робочої поверхні кулачка розподільного вала.

Виклад основного матеріалу. Моделювання НДС з'єднання «кулачок – штовхач» газорозподільного механізму двигуна КамАЗ виконувалося у наступній послідовності:

- створення геометричної моделі;
- розбиття моделі на сітку скінченних елементів;
- застосування до моделі граничних умов;
- отримання чисельного рішення;
- аналіз результатів.

Для отримання достовірного результату слід встановити початкові дані, які б забезпечували умови дослідження, максимально близькі до реальних. З цією метою визначенні конструктивні особливості досліджуваного механізму та розподільного вала. При проведенні моделювання роботи розподільного вала слід врахувати сили, що діють в газорозподільному механізмі. Розглянута наступна схема сил, що діють в газорозподільному механізмі в момент відкривання клапана, тобто при набіганні кулачка розподільного вала на штовхач (рис. 3).

При виборі значення сил керувалися наступними міркуваннями. Під час знаходження клапана у відкритому положенні, кулачок розподільного вала створює зусилля, яке необхідне для подолання сили пружності пружин. У розглянутому механізмі конструкцією передбачено дві співвісні пружини, які створюють загальну силу пружності $F_{ov} = 820$ Н.

Це зусилля передається через коромисло, яке по суті є двоплечим важелем із співвідношенням плечей $l_2 : l_1 = 1,55$, що приводить до прикладення сили F до штанги та штовхача, величина якої складає:

$$F = 820 \cdot 1,55 = 1271 \text{ Н.}$$

Відповідно, на кулачок буде діяти сила реакції, значення якої відповідає силі F :

$$R = F = 1271 \text{ Н.}$$

В результаті взаємодії між поверхнею штовхача та кулачка розподільного валу виникає сила тертя, що спрямовується по дотичній до профільної поверхні кулачка у напрямку, протилежному обертанню розподільного валу. Зазначимо, що при проведенні моделювання нехтували силами тертя в клапані та коромислі, так як в ці деталі не вносилися конструктивні та технологічні зміни, а також прикладенням обертального моменту, який не вносить суттєвого впливу на параметри НДС кулачків.

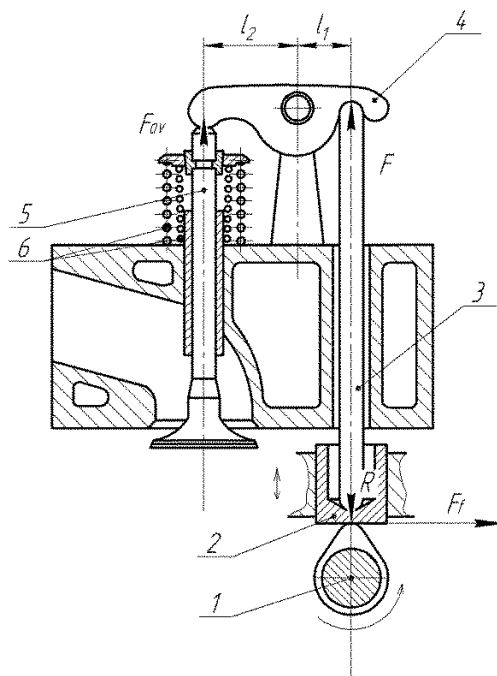


Рисунок 3 – Схема сил, що діють в газорозподільному механізмі в момент відкриття клапана: 1 – розподільний вал; 2 – штовхач; 3 – штанга; 4 – коромисло; 5 – клапан; 6 – пружини

Джерело: розроблено авторами

Сила тертя, що виникає між кулачком та штовхачем, визначалася з урахуванням коефіцієнта тертя:

$$F_f = k_f \cdot F,$$

де k_f – коефіцієнт тертя (для пари «сталь – сталь» та «сталь – латунь» за умови присутності мастильного матеріалу коефіцієнт тертя складає відповідно 0,28 і 0,12 [15]).

Крім того, при побудові моделі розподільного валу враховані його матеріал – сталь 18ХГТ. В якості інших граничних умов були прийняті особливості закріплення розподільного валу. За базові установочні поверхні взяті опорні шийки розподільного валу. Для адекватного відтворення режиму навантажень на деталі вузла розподільного валу створена геометрична модель розподільного валу, що контактує опорними шийками з втулками, а кулачком – з одним із штовхачів (рис. 4).

При цьому передбачено навантаження, що діє з боку штанги на внутрішню поверхню штовхача, яке з'являється при набіганні кулачка розподільного валу на штовхач в момент відкриття клапана. Величина даного навантаження обумовлюється жорсткістю клапанних пружини та співвідношенням довжин плечей коромисла.

Крім того, при створенні моделі накладені зв'язки на деталі вузла (рис. 3). Зокрема, встановлена жорстка фіксація до зовнішньої циліндричної поверхні втулки, яка імітує її посадку із натягом в блоці циліндрів. Зовнішні поверхні опорних шийок розподільного валу та зовнішня циліндрична поверхня штовхача вказані як рухомий ковзаючий контакт. Розбиття геометричної моделі (рис. 4) на сітку скінчених елементів дозволило побудувати скінчено-елементну модель (рис. 5).

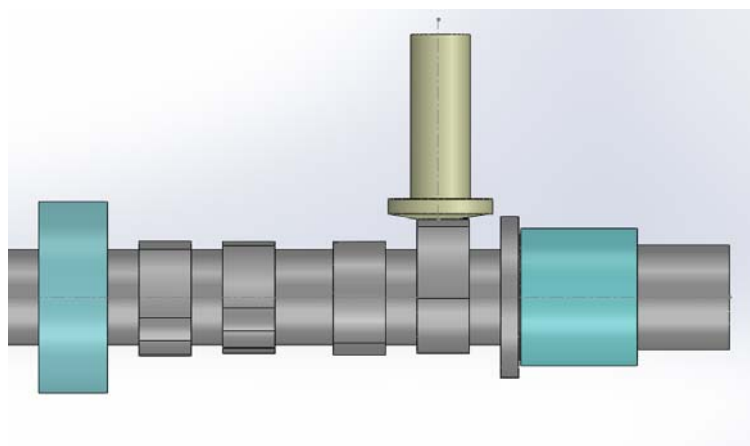


Рисунок 4 – Геометрична модель вузла розподільного валу

Джерело: розроблено авторами

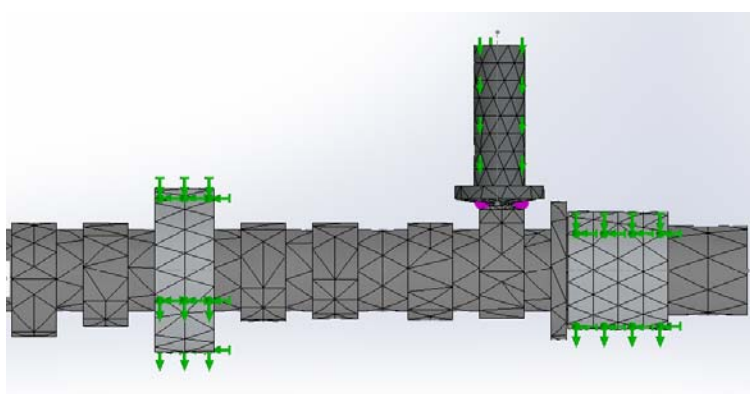


Рисунок 5 – Скінчено-елементна модель вузла розподільного валу

Джерело: розроблено авторами

Моделювання виконувалося з використання програмного комплексу SolidWorks [16] для двох варіантів виконання розподільного валу:

- базового – сталеві кулачки розподільного валу контактують із сталевим штовхачем;
- запропонованого – кулачки з антифрикційним покриттям, нанесеним ФАБО, контактують із сталевим штовхачем.

За результатами моделювання отримано наступний розподіл напружень в деталях вузла розподільного валу (рис. 6).

Отримані дані (рис. 6) свідчать про те, що саме в зоні контакту «кулачок – штовхач» спостерігаються максимальні значення напружень.

З метою встановлення доцільності ФАБО кулачків розподільного валу розглянемо закономірності розподілу напружень для двох варіантів досліджень: базового та запропонованого (рис. 7).

Якісний аналіз напружень (рис. 7) дозволяє визначити, що розподільний вал з кулачком, що має антифрикційне покриття (рис. 7, б), сприймає менші силові напруження ніж кулачки базового виконання (рис. 7, а), а отже, буде піддаватися меншому зношуванню.

Зменшення зношування кулачків з антифрикційними покриттями підтверджують отримані епюри переміщень (рис. 8).

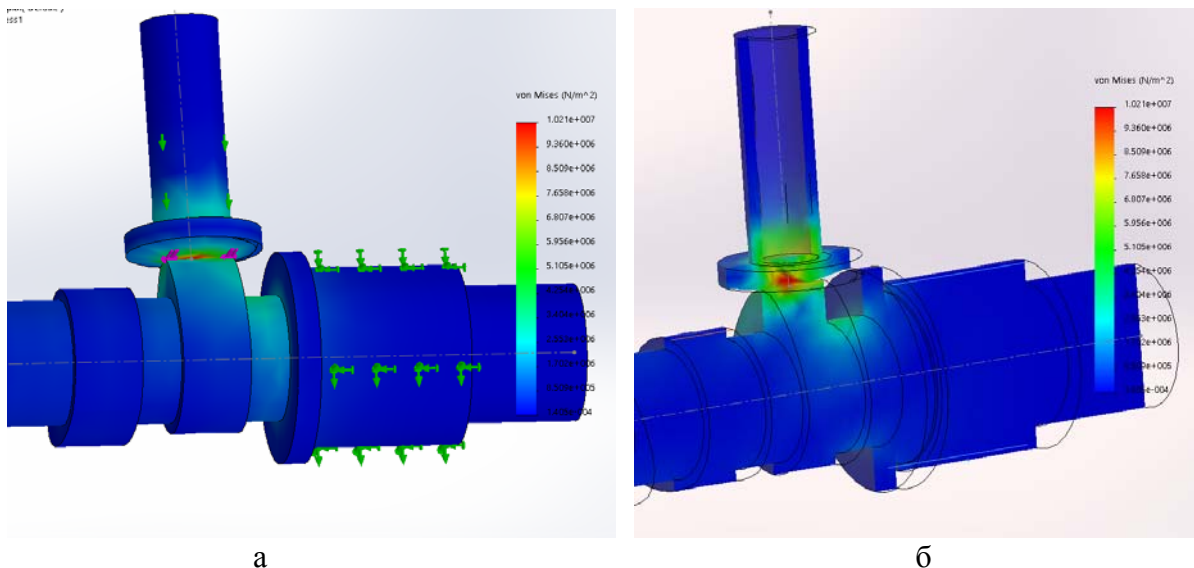


Рисунок 6 – Розподіл напружень в деталях вузла розподільного валу: а – на поверхні;
б – у площині, що проходить вздовж розподільного валу

Джерело: розроблено авторами

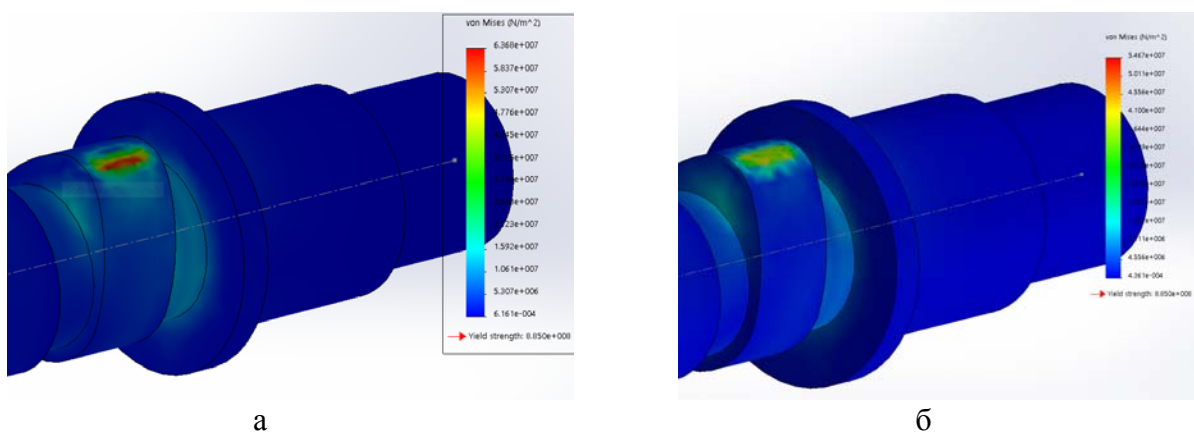


Рисунок 7 – Розподіл напружень на поверхні кулачка розподільного валу: а – базовий варіант виконання розподільного валу; б – розподільний вал з кулачками, обробленими ФАБО

Джерело: розроблено авторами

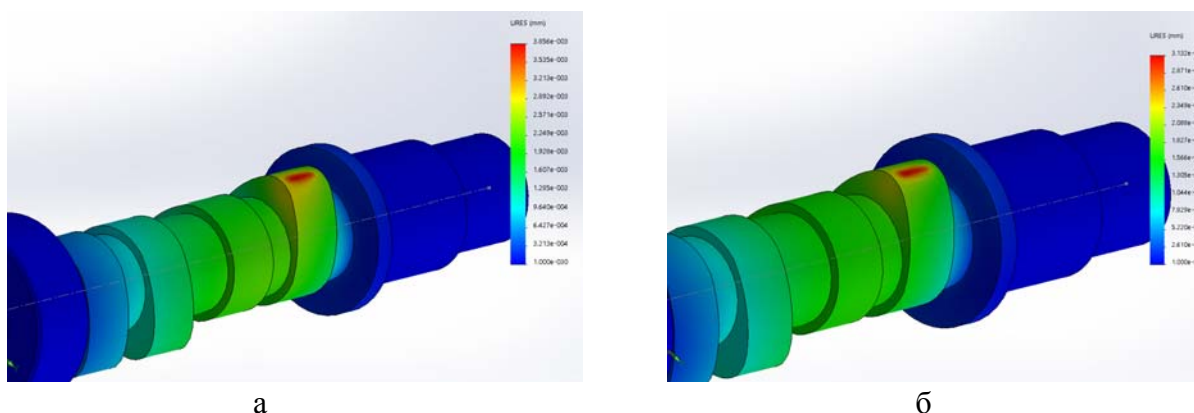


Рисунок 8 – Розподіл переміщення на поверхні кулачка розподільного валу: а – базовий варіант виконання розподільного валу; б – розподільний вал з кулачками, обробленими ФАБО

Джерело: розроблено авторами

З огляду на характер і розмір епюр поверхневого шару кулачка встановлено, що величина переміщень близька за значеннями для обох варіантів виконання розподільного валу, проте розмір плями максимальних переміщень має дещо менші значення для кулачка з антифрикційним покриттям.

Розподіл напружень в напрямку від вершинки кулачка до осі розподільного валу можна спостерігати на рис. 9.

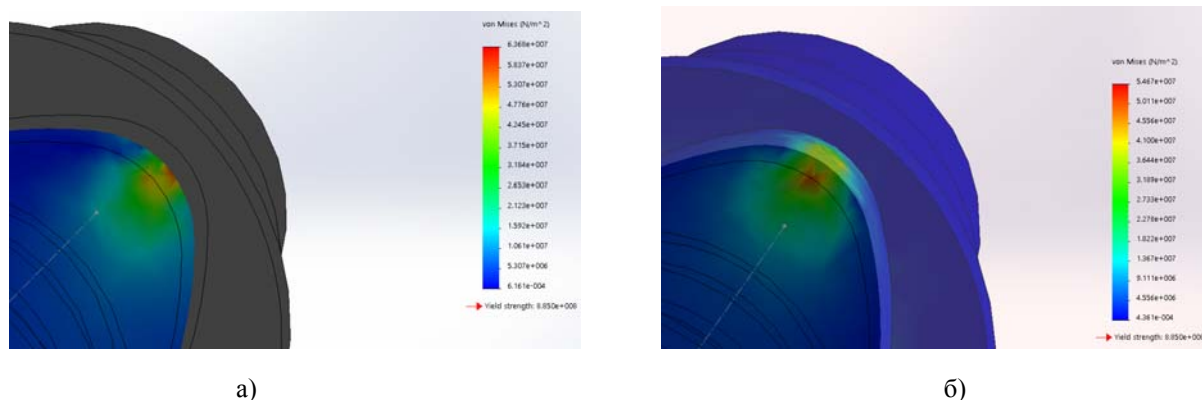


Рисунок 9 – Розподіл напружень в середньому перерізі кулачка: а – базовий варіант виконання розподільного валу; б – розподільний вал з кулачками, обробленими ФАБО

Джерело: розроблено авторами

Можливо констатувати (рис. 9), що поле напружень в поверхневих шарах кулачка з антифрикційними покриттям має менші значення, проте всередині кулачка значних змін напружень за величиною не відбуваються. За результатами моделювання отримані наступні закономірності зміни напружень на поверхні кулачка (рис. 10).

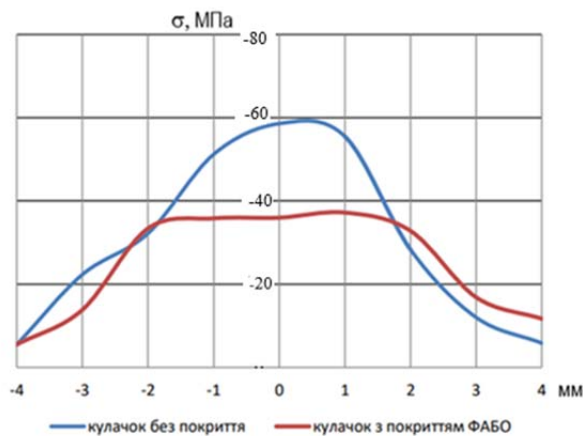


Рисунок 10 – Зміна напружень на поверхні кулачка («0» – вісь симетрії кулачка)

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що максимальне напруження по Мізесу складає близько 60 МПа для кулачка без покриття та близько 37 МПа для кулачка з антифрикційним покриттям (рис. 10). Крім того, зафіксовано зміну форми епюри: в кулачках з антифрикційними покриттями напруження більш рівномірно прикладені в плямі контакту.

Результати моделювання напруженого стану в напрямку від поверхні – вглиб кулачка по осі його симетрії в середній площині дозволили отримати наступні закономірності (рис. 11).

За наведеними даними (рис. 11) впливає, що у поверхневому шарі кулачка без покриття напруження стиснення до глибини 0,8 мм мають значно більші значення ніж

для кулачків з антифрикційними покриттями. Далі – за глибиною, спостерігаються досить близькі значення напружень при обробці кулачка за традиційною технологією та з використанням ФАБО.



Рисунок 11 – Зміна напружень від поверхні вглиб кулачка

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, отриманні результати моделювання дозволяють стверджувати про доцільність ФАБО робочій поверхні кулачка з точки зору покращення її НДС: спостерігаються значне зменшення напружень стиснення на певній глибині та їх рівномірне прикладення в зоні контакту. Такий характер змін можна пояснити наступним чином. Внаслідок фрикційно-механічної дії інструмента, що відбувається при ФАБО, поверхневий шар кулачка зміцнюється, а наявність антифрикційного покриття значно зменшує коефіцієнт тертя та служить твердим мастилом.

Висновки.

1. Дослідження напружено-деформованого стану з'єднання «кулачок – штовхач» газорозподільного механізму ДВЗ засвідчило про можливість підвищення довговічності розподільного вала за рахунок нанесення на робочу поверхню кулачка антифрикційних покриттів.

2. Визначення сил, що діють в газорозподільному механізмі, а також граничних умов моделювання, дозволило побудувати модель розподільного вала, що контактує опорними шийками з втулками, а кулачком – з одним із штовхачів.

3. Моделювання напружено-деформованого стану досліджуваного вузла дозволило визначити основні закономірності зміни напружень на поверхні кулачка. Отриманні дані дозволяють стверджувати, що робоча поверхня кулачка, яка має антифрикційне покриття, сприймає менші силові напруження ніж кулачки базового виконання. При цьому, на відміну від кулачків базового виконання, спостерігається рівномірний розподіл напруження. Такий характер змін напружень дозволяє прогнозувати зменшення зношування кулачків з антифрикційними покриттями, а отже, підвищення надійності роботи розподільного вала ДВЗ.

Список літератури

1. Márquez-Cortés, R., Martínez-Trinidad, J., Flores-Martínez, M. et al. Sliding Wear Resistance of Borided AISI 4140 Steel. *J. of Materi Eng and Perform* 32, 9101–9113 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07773-6>
2. Кисликов В.Ф., Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. К.: Либідь, 2006. 400 с.
3. Сирота В.І. Основи конструкції автомобілів. К.: Аристей, 2005. 280 с.

4. Шипунов М. В. Оптимізація роботи газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*. 2013. Вип. 1(2). С. 166–175. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_1%282%29_21
5. Тимофеев С.С., Ленів Я.Г. Сучасні вимоги до способів відновлення розподільних валів транспортних дизелів. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів». 02–06 черв. 2014 р. Ялта. Київ: АТМ України, 2014. С. 131–132.
6. Фролов Є.А., Кравченко С.І., Попов С.В., Гнітько С.М. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: Монографія. Полтава, 2019. 201 с.
7. Кравченко С.А., Посвятенко Е.К., Д'яченко С.С. та ін. Числове обґрунтування параметрів дискретного зміцнення високонавантажених деталей машин. *Вісник Національного технічного університету „ХПИ”*. 2011. № 51. С. 111–136.
8. Ткачук М.А., Кравченко С.О., Шпаковський В.В. Розвиток методів зміцнення найбільш навантажених деталей – шлях до підвищення технічних і тактико-технічних характеристик машин. *Вісник Національного технічного університету „ХПИ”*. 2015. № 43 (1152). С. 116–122.
9. Рудик О., Дитинюк В., Стебелецька Н. Моделювання умов роботи і зносостійкості валу зчеплення двигуна транспортного засобу. *Проблеми трибології*. 2018. № 90(4). С. 70–79.
10. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Lizunkov, O., Vasylenko, I., Osin, R. (2023). The Stress-Deformed State of the Cylinder Liner's Working Surface. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Piteř, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 347-355. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_33
11. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19
12. Patil, V.S., Takale, A.M. (2024). Design and Analysis of Cylinder Head Gasket Under Engine Cold Assembly and Cold Start Condition. In: Sahu, R., Prasad, R., Sahoo, K.L. (eds) *Advancements in Materials Processing Technology*, Volume 1. AMPT 2023. Springer Proceedings in Materials, vol 48. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4958-4_29
13. Gontarovskiy, P.P., Smetankina, N.V., Garmash, N.G. et al. Three-Dimensional Stress-Strain State Analysis of the Bimetallic Launch Vehicle Propellant Tank Shell. *Strength Mater* 55, 916–926 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00582-9>
14. Matvienko, M.V., Martynenko, V.O. & Vakhonina, L.V. Stress–Strain State of Joints with a Soft Interlayer Under Mechanical Loading. *Int Appl Mech* 59, 100–106 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01203-3>
15. Войтов В.А., Кравцов А.Г. Трибологічні властивості технічних олиव на базі соняшникової та ріпакової олій. *Проблеми трибології*. 2011. № 4. С. 87–92.
16. SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com> (дата звернення: 05.03.2025).

References

1. Márquez-Cortés, R., Martínez-Trinidad, J., Flores-Martínez, M. et al. Sliding Wear Resistance of Borided AISI 4140 Steel. *J. of Materi Eng and Perform* 32, 9101–9113 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07773-6>.
2. Kislikov, V.F., Lushchik, V.V. (2006). Budova y ekspluatatsiia avtomobiliv [Structure and operation of cars]. Kyiv: Lybid, 400 s [in Ukrainian].
3. Syrota, V.I. (2005). Osnovy konstruktzii avtomobiliv [Fundamentals of car design]. Kyiv: Arystei, 280 s [in Ukrainian].
4. Shypunov, M. V. (2013). Optimising the operation of the gas distribution mechanism of an internal combustion engine. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Yu. Kondratiuka. Serii: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*. Vyp. 1(2). 166–175 [in Ukrainian].
5. Tymofieiev, S.S., Leniv, Ya.H. (2014). Modern requirements to the methods of restoring camshafts of transport diesel engines. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv»*. Yalta. Kyiv: АТМ України. 131–132 [in Ukrainian].
6. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). Technological support for the quality of engineering products. Poltava, 201. [in Ukrainian].
7. Kravchenko, S.A., Posviatenko, E.K., D'iachenko, S.S. et al. (2011). Numerical justification of parameters of discrete strengthening of highly loaded machine parts. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu „KhPI”*. 111–136 [in Ukrainian].

8. Tkachuk, M.A., Kravchenko, S.O., Shpakovskyi, V.V. (2015). Development of methods for strengthening the most stressed parts is the way to improve the technical and tactical characteristics of machines. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu „KhPI”*. № 43 (1152). 116–122 [in Ukrainian].
9. Rudyk, O., Dytyniuk, V., Stebeletska, N. (2019). Modeling of working conditions and wear resistance of the vehicle's clutch shaft. *Problems of Tribology*, 90(4), 70–79 [in Ukrainian].
10. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Lizunkov, O., Vasylenko, I., Osin, R. (2023). The Stress-Deformed State of the Cylinder Liner's Working Surface. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 347-355. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_33.
11. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19.
12. Patil, V.S., Takale, A.M. (2024). Design and Analysis of Cylinder Head Gasket Under Engine Cold Assembly and Cold Start Condition. In: Sahu, R., Prasad, R., Sahoo, K.L. (eds) *Advancements in Materials Processing Technology*, Volume 1. AMPT 2023. Springer Proceedings in Materials, vol 48. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4958-4_29.
13. Gontarovskiy, P.P., Smetankina, N.V., Garmash, N.G. et al. Three-Dimensional Stress-Strain State Analysis of the Bimetallic Launch Vehicle Propellant Tank Shell. *Strength Mater* 55, 916–926 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00582-9>.
14. Matvienko, M.V., Martynenko, V.O. & Vakhonina, L.V. (2023). Stress–Strain State of Joints with a Soft Interlayer Under Mechanical Loading. *Int Appl Mech* 59, 100–106. <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01203-3>.
15. Voitov, V.A., Kravtsov, A.H. (2011). Tribological properties of technical oils based on sunflower and rapeseed oils. *Problems of Tribology*, 4, 87–92 [in Ukrainian].
16. SolidWorks. <https://www.solidworks.com>.

Ihor Shepelenko, Prof., DSc., **Artem Krasota**, **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Changing the Stress-strain State of the Working Surface of a Part with an Antifriction Coating

The article deals with the issue of increasing the durability of the camshaft of an internal combustion engine by improving the operational properties of cams. It is determined that by studying the stress-strain state of individual elements of a part, it is possible to solve a number of technological problems. Taking into account that in most cases the destruction of a part begins from its surface, the stress-strain state of the surface layer has a significant impact on the operational properties of parts. The study of the parameters of the stress-strain state on the working surface of the cam of the camshaft of an internal combustion engine was carried out by modelling using the finite element method.

The model takes into account the design features of the camshaft, the operating conditions of the cam-pusher connection, and the forces acting in the gas distribution mechanism at the moment of valve opening. To adequately reproduce the loads in the details of the studied assembly, a finite element model of the camshaft was created, with the camshaft journals in contact with the bushings and the cams in contact with one of the pushrods. The calculation results confirmed that it is in the cam-pusher contact zone that the maximum stress values are observed.

To determine the ways to improve the operational properties of the working surfaces of cams, the parameters of the stress-strain state of the base cam and the cam with an antifriction coating applied by finishing antifriction non-abrasive treatment were investigated. It was found that the maximum stress is about 60 MPa for the uncoated cam and about 37 MPa for the cams with antifriction coatings. In addition, a change in the shape of the diagram was recorded: in the cams with antifriction coatings, the stresses are more evenly applied in the contact patch. The improvement in the stress state of the cams can be explained by the presence of an antifriction coating, which reduces not only the friction coefficient but also serves as a solid lubricant. The obtained regularities allow us to assert the expediency of finishing antifriction non-abrasive treatment of cams when solving the issue of increasing the durability of the camshaft.

camshaft, gas distribution mechanism, cam-pusher connection, finite element model, stress-strain state, wear resistance, antifriction coating

Одержано (Received) 05.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.383.51

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.190-197](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.190-197)

О. П. Голик, доц., канд. техн. наук, Р. В. Жесан, доц., канд. техн. наук,
О. В. Корсіков, О. А. Неруш

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: degoelena@gmail.com

Методика дослідження вольт-амперних характеристик сонячних елементів в штучних умовах

В статті запропоновано для проведення аналізу методів підвищення ефективної роботи фотоелектричних модулів попередньо досліджувати роботу сонячних елементів, з яких складається фотоелектричний модуль, в штучних умовах з метою визначення показників зміни потенційного бар'єра і, як наслідок, усунення s-подібного вигину вольт-амперної характеристики сонячного елемента. **сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, спектральний діапазон, температура, струм**

Постановка проблеми. В сучасних умовах енергетичної кризи в Україні нагальним завданням є вирішення проблеми більшої генерації електроенергії. Традиційно генерація електроенергії відбувається за рахунок теплових та атомних електростанцій. Але постійні обстріли енергетичного сектору України пошкодили значну кількість електростанцій, що призвело до дефіциту електроенергії для споживачів. В таких умовах доцільним є застосування альтернативних джерел енергії. Найдоступнішим серед цих джерел є сонячна енергія. Як правило, для перетворення сонячної енергії в електричну застосовують фотоелектричні модулі з сонячних елементів (СЕ), матеріалом для яких слугують напівпровідники. Ефективність перетворення сонячної енергії в напівпровідникових матеріалах суттєво залежить від зміни зовнішньої температури оточуючого середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] наведено переваги, недоліки, різновиди та типи фотоелектричних модулів та СЕ. В статті [2] зазначено, що при низьких зовнішніх температурах виникає ефект вигину вольт-амперної характеристики (ВАХ) СЕ, що призводить до зменшення напруги і, як наслідок, зниження потужності.

В роботі [3] виконано аналіз методів та засобів для контролю ВАХ сонячних батарей. Розглянуто існуючі стендові засоби за допомогою яких можна здійснювати контроль ВАХ сонячних батарей та проведено аналіз їх переваг та недоліків. Авторами в статті встановлено, що універсального засобу вимірювання ВАХ СЕ не існує. Тому для розв'язання цього завдання авторами запропоновано удосконалення імпульсних засобів, яке полягає в тому, що необхідно розширити діапазон струму та зменшити виділення тепла в циклі вимірювання, що дозволить зменшити методичну похибку вимірювання.

Пропозиції щодо перспектив та подальших досліджень сонячних установок наведено в роботі [4]. Авторами проведено аналіз основних напрямків поліпшення роботи сонячних електростанцій та приведені результати експериментальних досліджень сонячних панелей. На основі експериментальних даних було побудовано ВАХ фотоелектричних панелей. В результаті проведення експериментів авторами було підтверджено, що на роботу фотоелектричних панелей суттєво впливають рівень

освітленості та температури оточуючого середовища. Також автори зазначають, що в природному середовищі неможливо забезпечити однакові умови освітлення, температури та затінення для всіх СЕ одночасно. Тому для аналізу роботи сонячних панелей при однакових зовнішніх умовах доцільно мати експериментальну установку, яка повинна забезпечувати постійний рівень освітлення та температури. В такому випадку можна буде моделювати ВАХ та здійснювати підбір сонячних панелей з однаковими параметрами.

Для проектування та проведення випробувань фотоелектричних батарей великих розмірів авторами в [5] запропоновано підхід для побудови ВАХ фотоелектричних батарей, згідно якого за допомогою ВАХ окремого СЕ можна отримати моделі при різних умовах освітленості, затінення та температури з відповідними параметрами фотоелектричних батарей будь-якого розміру. Розроблено математичну модель та визначено її перехідні коефіцієнти. Автори стверджують, що використання запропонованого методу дозволить точно визначити схемні витрати для будь-яких матеріалів фотоперетворювачів (Si, GaAs тощо).

В роботі [6] було розроблено метод для визначення невідомих параметрів однорідної моделі для фотоелектричних модулів на основі значень бази даних. Запропонований алгоритм дає можливість визначити коефіцієнти струму, напруги та опору оптимальних до ідеальних умов роботи фотоелектричного модуля.

З метою вимірювання шунтового опору СЕ в [7] авторами запропоновано та обґрунтовано безконтактний метод за допомогою якого можна здійснювати неруйнівний контроль сонячних панелей в режимі їх експлуатації. Автори зазначають що це дозволить здійснювати діагностику раптових відключень, аварій та деградації сонячних модулів у складі сонячних електростанцій.

У статті [8] наведено результати аналізу залежності фотоелектричних характеристик СЕ залежно від різних параметрів. Авторами зазначено, що при підвищенні температури відбувається зниження таких характеристик СЕ, як коефіцієнт корисної дії, струм короткого замикання, коефіцієнт заповнення та інших параметрів, які характеризують ВАХ. Крім того автори виділяють окремим показником освітленість, яка істотно впливає на перетворення сонячної енергії. Було проведено моделювання для різних умов інтенсивності та освітленості, і в результаті доведено яким чином змінюється струм та напруга при змінному освітленні впродовж дня або інтенсивності сонячного випромінювання. автори зазначають, що існуючі способи за допомогою яких можна виконувати моделювання роботи СЕ потребують удосконалення, шляхом урахування структури матеріалу, умов затінення, освітленості, температури. Це дасть можливість підвищити точність розрахунків при проектуванні та дослідженні роботи сонячних панелей в реальних умовах.

В роботі [9] наведено результати моделювання та оптимізації сонячних електростанцій за різних метеорологічних умов, шляхом комп'ютерного експерименту на основі щорічних даних 50 метеостанцій. В результаті було визначено, що при підвищеній хмарності доцільним є оптимізувати кут нахилу сонячної панелі. Для скорочення часу розрахунку автор рекомендує використовувати вибірку за 10 або 20 хвилин. Автором розроблено схему моделювання, де вхідними параметрами є час, інтенсивність сонячного випромінювання, температура навколишнього середовища та швидкість вітру. Методом інтегрування отриманих значень було зроблено прогнозування генерації електроенергії протягом року.

В джерелах [10, 11, 12] зазначено, що згідно з проведеними експериментальними дослідженнями автори вказують на наявність суттєвого впливу температури на показники ВАХ СЕ. При цьому при істотному зростанні температури вихідна потужність СЕ може знизитись від 22% до 30%. Відповідно при зниженні температури

якість роботи напівпровідникових матеріалів може покращитись. Сонячні елементи втрачають свою ефективність у випадках коли працюють в умовах за межами оптимального діапазону температур. Для кристалічних кремнієвих СЕ з кожним градусом Цельсія вище оптимальної температури ефективність може знизитись приблизно на 0,4%-0,5%, і як наслідок, при температурі на 25°C вище оптимальної робочої температури ефективність СЕ може зменшитись на 10-12,5%.

Постановка завдання. Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на ефективність роботи СЕ суттєво впливає зовнішня температура. Розроблених методів усунення цієї проблеми не існує, тому автори пропонують при проектуванні систем сонячного електропостачання здійснювати моделювання роботи фотоелектричних модулів в штучних умовах, використовуючи відповідні стимулятори метеорологічних умов. Таким чином можна сказати, що температура відіграє вирішальну роль у визначенні ефективності СЕ, оскільки ця ефективність впливає на здатність СЕ перетворювати сонячну енергію в електроенергію.

Метою роботи є дослідження вольт-амперних характеристик сонячних елементів при зміні умов освітленості та температури оточуючого середовища. Для досягнення поставленої мети в статті запропоновано методику дослідження ВАХ СЕ в штучних умовах, що дозволить в подальшому виконати аналіз методів підвищення енергоефективності роботи фотоелектричних модулів та системи сонячного електропостачання в цілому.

Пропонується розробити схему пристрою для вимірювання ВАХ СЕ в штучних умовах. При цьому в дослідженнях основною характеристикою фотоелектричного модуля є ВАХ, яку необхідно вимірювати при освітленні поверхні зразка СЕ випромінюванням від імітатора сонячного випромінювання (ІСВ).

Основний матеріал. Для дослідження впливу температури на показники ВАХ СЕ, припустимо що вимірювальне обладнання працює в таких умовах:

- вологість повітря - $(70 \pm 10) \%$;
- напруга мережі - $(220 \pm 22) \text{ В}$;
- температура оточуючого середовища - $(22 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$;
- частота змінного струму - $(50 \pm 1) \text{ Гц}$.

Характер співвідношення спектральної характеристики СЕ зі спектром сонячного випромінювання визначає коефіцієнт корисної дії СЕ.

В штучних (лабораторних) умовах опромінення поверхні фотоелектричного модуля відповідно до необхідної концентрації сонячного випромінювання, можна реалізувати за допомогою зміни відстані між джерелом випромінювання та СЕ. Для коригування спектра випромінювання слід застосовувати спеціальні світлофільтри, які коригують спектральний склад випромінювання, наближаючи його до стандартного сонячного спектру (AM0) або сонячного спектру на поверхні Землі після проходження атмосфери (AM1,5). Вимірювання необхідно виконувати постійно для всієї ВАХ.

Охолодження СЕ до -170°C та потім нагрів до $+30^\circ\text{C}$ в установці буде забезпечуватися за рахунок додаткового використання системи терморегулювання з мінікріостатом. При цьому СЕ необхідно встановити на основу терморегулятора, який знаходиться в мінікріостаті. Випромінювання від ІСВ буде проходити крізь верхнє віконце кріостата. Варіювання освітленості зразка, що розташований на вертикально орієнтованій терморегульованій основі у кріостаті, здійснюється шляхом переміщення вимірювального столика у вертикальному положенні. Для коригування параметрів ІСВ в якості контрольного вимірювального елемента використано еталонний СЕ.

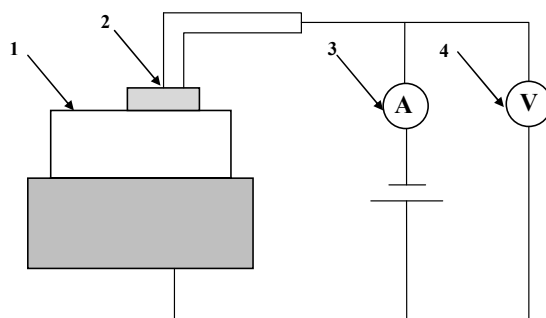
До складу установки входять:

- імітатор сонячного випромінювання;

- мінікріостат;
- вимірювальний прилад для напруги, струму та опору (калібратор-мультиметр);
- контролер температури з ПІД-регулятором;
- персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Також установка має у своєму складі механічний пристрій для плавного регулювання відстані "зразок-освітлювач". Імітатор сонячного випромінювання повинен за спектральним складом відтворювати спектр Сонця AM1,5G.

Схема для проведення вимірювань показана на рис. 1.



1 – сонячний елемент; 2 - омичний контакт; 3 - амперметр (реєстрація струму, що проходить через зразок); 4 - вольтметр

Рисунок 1 – Схема проведення вимірювань

Джерело: розроблено авторами

Дана установка призначена для вимірювання ВАХ дво- або чотиризондовим методом. В якості джерела-вимірювача використано прилад Keithley 2450 [13], який забезпечує генерацію струмів у межах від 500 фА до 1 А, а вимірювання від 10 фА до 1,05 А, а напруга розгортки становить ± 21 В.

В якості мінікріостату можна використати типовий кріостат, що використовується в побутових холодильниках. Як правило, до складу такого кріостату входять:

- трубка для подачі рідкого азоту;
- кварцове скло;
- контактна група для нагрівача та чотирьох зондів;
- теплопровідні пластини;
- керамічна пластина для нагрівання;
- кювета з вакуумними стінками.

Застосування калібратора-мультиметра Keithley 2450 обґрунтовано його технічними характеристиками, наявністю сенсорного екрану та можливістю широкого інтерфейсу підключення. Крім того присутня можливість експорту даних в електронні таблиці, що дозволить виконати обробку результатів вимірювань та побудувати ВАХ СЕ.

В якості ІСВ доцільно обирати вже готові пристрої відповідно до стандарту IEC 60904-9, які налаштовані на спектральний збіг та нерівномірність освітлення [14-16]. Також до їхнього складу може входити світлофільтр.

Для проведення вимірювань запропоновано зразок СЕ з гетероструктурою, який показаний на рис. 2. Процес вимірювання полягає у зміні енергії спорідненості до електрону близько до шару (р) α -Si. Для проведення вимірювань припустимо, що зміна ВАХ для структури, наведеної на рис. 2, при низьких температурах відбувається

внаслідок наявності бар'єра між зонами (n)c-Si:H та (p) α -Si, який є "корисним" бар'єром для неосновних носіїв заряду.

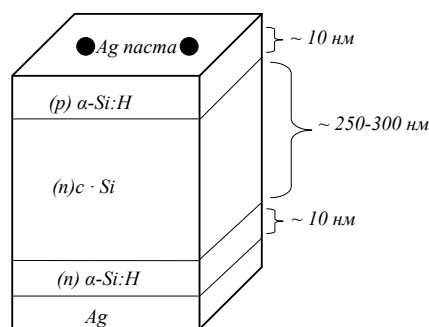


Рисунок 2 – Схема гетероструктури сонячного елемента на основі кремнію

Джерело: розроблено авторами

В свою чергу також із міною цієї енергії можна змінити висоту потенційного бар'єра, а потім після виконання розрахунків для різних температур простежити його вплив на ВАХ СЕ. Але при охолодженні він є бар'єром і для основних носіїв ("дирок"). Як правило, зонні діаграми гетероструктури мають вигляд, показаний на рис. 3.

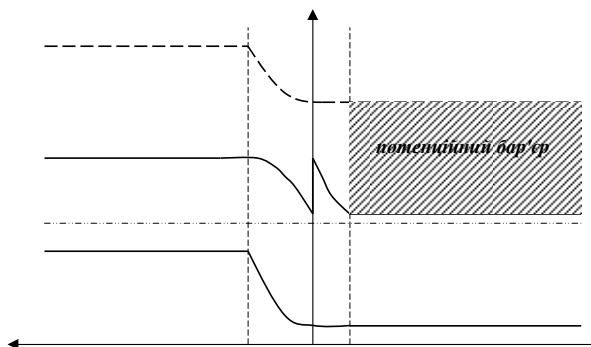


Рисунок 3 – Типові зонні діаграми сонячного елемента з гетероструктурою

Джерело: розроблено авторами

Алгоритм проведення вимірювань:

1. Експериментальний зразок необхідно закріпити (приклеїти) за допомогою срібної паста на робочу поверхню (стіл) з голками-зондами. Розміри зразків повинні бути обмежені конструктивними особливостями обраного криостата та не перевищувати розмір 20x20 мм.

2. Стіл має чотири виходи для кожного вимірювального зонду. Для зменшення впливу шкідливого опору на вимірювальних проводах застосовано 2 нижніх та 2 верхніх контакти.

3. Помістити зразок до камери криостата.

4. Електричні виходи контактів зондів слід підключити до вимірювача імітансу (може бути окремий прилад або, як в даному випадку, калібратор-мультиметр).

5. Забезпечити наявність вакууму в середині камери криостата (обов'язкова наявність насоса).

6. За допомогою термоконтролера стабілізувати значення температури на заданих проміжках. Для цього стіл повинен мати температурний сенсор на основі платини (pt100). Цей сенсор є одним з двох датчиків температури, а інший датчик встановлений в криостаті. Завдяки цьому відбувається термостабілізація в камері криостата. Також регулювання температури слід здійснювати джерелом живлення згідно показників платинового термоопору, який слід розташовувати максимально поблизу вимірювального зразка. Робочий температурний діапазон криостата повинен

знаходиться в межах 100-450 °K. З метою запобігання створення конденсату ззовні кріостат повинен мати подвійний шар теплоізоляції.

7. За допомогою відповідного програмного забезпечення, що входить до складу вимірювального обладнання, фіксувати значення ємності та провідності експериментального зразка в діапазоні частот від 25 Гц до 1 МГц.

8. Виконати обробку отриманих даних та побудувати графіки залежності ємності та провідності гетеропереходу експериментального зразка від температури при різних частотах.

9. З метою отримання максимумів частот на основі отриманих залежностей необхідно побудувати графік залежності похідної ємності від температури.

10. Відповідно до значень максимумів частот необхідно побудувати графік Арреніуса, згідно нахилу якого можна визначити значення енергії активації. Чисельне значення енергії активації повинно приблизно дорівнювати висоті потенційного бар'єра на межі між шарами (n)c-Si:H та (p)α-Si.

Було висунуто гіпотезу, що зменшення або збільшення потенційного бар'єра дасть можливість позбутися s-подібного вигину ВАХ СЕ.

Методика проведення експериментальних досліджень наступна. Вихідним параметром для розрахунку концентрації сонячного випромінювання є значення фотоструму еталонного СЕ при умовах, що освітленість за одну сонячну постійну при температурі зразка 25°C. Встановлення необхідного рівня енергетичної освітленості забезпечується шляхом зміни відстані між зразком та освітлювачем. Здійснюються вимірювання значень струму короткого замикання еталонного зразка з метою досягнення ним значення для кратності в одне сонце, яке зазначено в паспорті еталону.

Для цього при відкритій заслінці на ІСВ на під'єднаному вимірювальному приладі буде відбуватися реєстрація значень струму короткого замикання еталону. Після чого слід зафіксувати відстань "зразок-освітлювач". Таким чином буде створено прив'язку значень еталонного зразка до СЕ, яка забезпечить реєстрацію енергетичної освітленості та контроль її відтворюваності при довготривалих температурних дослідженнях. Процес дослідження впливу температури на ВАХ СЕ та його коефіцієнт корисної дії при заданому рівні енергетичної освітленості полягає у послідовній зміні температури від -170°C до +30°C.

Для підтвердження або спростування гіпотези необхідно виконати вимірювання декількох зразків з різними характеристиками. Під час проведення моделювання необхідно змінювати висоту потенційного бар'єра між шарами (p)α-Si та (n)c-Si таким чином, щоб усунути s-подібний вигин ВАХ СЕ. Отримані дані в подальшому дадуть можливість зробити висновок щодо підвищення ефективності СЕ на основі кремнієвої гетероструктури з р-шаром аморфного гідрогенізованого та n-шаром кристалічного кремнію з метою позбавлення від залежності потенційного бар'єра на межі шарів від носіїв заряду при охолодженні.

Висновки. Оскільки не існує універсального способу чи засобу усунення проблеми впливу температури оточуючого середовища на енергоефективність СЕ, актуальним є проведення досліджень вимірювання ВАХ СЕ в різних температурних умовах. Запропонована в статті методика дослідження ВАХ СЕ в штучних умовах дозволяє змоделювати умови роботи сонячних елементів під впливом зміни зовнішньої температури та освітленості. Запропонована установка може бути зібрана в різних варіантах залежно від розмірів зразків, які досліджуються, та наявної можливості матеріальних витрат.

Отримані в результаті вимірювань значення струму та напруги дають можливість обрати їх оптимальні параметри з урахуванням зміни температури оточуючого середовища, що в свою чергу дасть можливість при проектуванні систем електропостачання з сонячними установками коректно розрахувати їх потужність із забезпеченням максимального коефіцієнта корисної дії.

Список літератури

1. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина 1 : навч. посіб. / О. П. Голик, Р. В. Жесан, І. В. Волков [та ін.]. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2020. 192 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/9295>.
2. Tsykh V., Kulchak A., Yavorskyi A. Analysis of research on the influence of temperature on the degradation and efficiency of solar panels. *Power Engineering: economics, technique, ecology*. 2024. No. 2. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303071>.
3. Божко К. М., Гуренко Г. С., Защепкіна Н. М. Research of the bench means for measuring current-voltage characteristics of solar cells and batteries. *ScienceRise*. 2016. Vol. 11. P. 30–32. doi.org/10.15587/2313-8416.2016.84426 .
4. Маєвський Д. А., Винаков О. Ф., Кетрарь О. А. Експериментальний аналіз роботи сонячних панелей із різними характеристиками. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2024. Т. 41, № 117. С. 12–22. URL: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/download/3285/1189/>.
5. Безручко К. В., Книш Л. І., Сінченко С. В. Забезпечення точності опису характеристик груп фотоперетворювачів і фотоелектричних батарей на основі цільових експериментів на комплексному обладнанні. *Vidnovluyana energetika*. 2020. № 3(62). С. 35–41. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3\(62\).35-41](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3(62).35-41).
6. A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data / R. Ndegwa et al. *Journal of Renewable Energy*. 2020. Vol. 2020. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/7580279> .
7. Божко К. М., Мушкет К. Я. Безконтактний метод вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі. *Технічна інженерія*. 2023. № 2(92). С. 174–181. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-174-181](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-174-181) .
8. Budanov P. Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. *Машинобудування*. 2024. No. 34. P. 92–103. URL: periodicals.karazin.ua/engineering/article/view/25095/22615.
9. Mayer M. J. Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 241. P. 114313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114313>.
10. New Design of Solar Photovoltaic and Thermal Hybrid System for Performance Improvement of Solar Photovoltaic / R. Hossain et al. *International Journal of Photoenergy*. 2020. Vol. 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8825489>.
11. Azimi-Nam S., Farhani F. Effect of Temperature on Electrical Parameters of Phosphorous Spin-on Diffusion of Polysilicon Solar Cells. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 41–45. URL: https://www.jree.ir/article_70105_08c49abfb6019aa4d7f0c12b508a998d.pdf.
12. How Temperature Impacts Solar Cell Efficiency - Solar N Plus. *Solar N Plus*. URL: <https://www.solarnplus.com/how-temperature-impacts-solar-cell-efficiency/>
13. Сенсорний калібратор-мультиметр 6,5 розрядів Keithley 2450. *Техенком – вимірювальні прилади та обладнання*. URL: <https://cutt.ly/SrwPyzff>.
14. Стенд лабораторний "Імітатор сонячного елемента" GES-100. *ООО "СПЕКТРО ЛАБ" - обладнання для лабораторій*. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1958350888-stend-laboratornyj-imitator.html> .
15. Симулятори сонячного світла - ТОВ «Селток Фотонікс». *ТОВ «Селток Фотонікс» - перший професійний каталог оптоелектроніки*. URL: https://seltokphotonics.com/catalog/analytical-laboratory-equipment/solar-simulator/?srsltid=AfmBOorZmQG8_bwSqXK-Uk0mEXFjXGg2kWlnXWY1UbNLg4sbTNjevE_u.
16. Інновації в оптиці. Сонячний симулятор. *Wavelength opto-electronic*. URL: <https://wavelength-oe.com/uk/innovation-in-optics-solar-simulator/>.

References

1. Holyk, O., Zhesan, R., Volkov, I., Chekanov, O., & Berezjuk, I. (2020). Energhozberezhennja ta vykorystannja ponovljuvanykh dzherel energiji. Chastyna 1. Lysenko V.F.
2. Tsykh, V., Kulchak, A., & Yavorskyi, A. (2024). Analysis of research on the influence of temperature on the degradation and efficiency of solar panels. *Power Engineering: economics, technique, ecology*, (2). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303071> [in Ukraine].
3. Bozhko, K. M., Ghurenok, Gh. S., & Zashhepkina, N. M. (2016). Research of the bench means for measuring current-voltage characteristics of solar cells and batteries. *ScienceRise*, 11, 30–32. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.84426>.
4. Majevs'kyj, D. A., Vynakov, O. F., & Ketrarj, O. A. (2024). Eksperymental'nyj analiz roboty sonjachnykh panelej iz riznymy kharakterystykamy. *Elektrotekhnichni ta komp'juterni systemy*, 41(117), 12–22. <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/download/3285/1189/>.
5. Bezruchko, K. V., Knysh, L. I., & Sinchenko, S. V. (2020). Zabezpechennja tochnosti opysu kharakterystyk ghrup foteretvorjувачив i fotoelektrychnykh batarej na osnovi ciljovykh eksperymentiv na kompleksnomu obladnanni. *Vidnovluyana energetika*, (3(62)), 35–41. doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3(62). 35-41.

6. Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E., & Odero, N. (2020). A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data. *Journal of Renewable Energy*, 2020, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2020/7580279>.
7. Bozhko, K. M., & Mushket, K. Ja. (2023). Bezkontaktnyj metod vymirjuvannja shuntovogho oporu okremykh sonjachnykh elementiv u skladi paneli. *Tekhnichna inzhenerija*, (2(92)), 174–181. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-174-181](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-174-181).
8. Budanov, P., Kupriyanov, O., Melnykov, V., & Kononov, V. (2024). Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. *Машинобудування*, (34), 92–103. <https://periodicals.karazin.ua/engineering/article/view/25095/22615> [in Ukraine].
9. Mayer, M. J. (2021). Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. *Energy Conversion and Management*, 241, 114313. doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114313.
10. Hossain, R., Ahmed, A. J., Islam, S. M. K. N., Saha, N., Debnath, P., Kouzani, A. Z., & Mahmud, M. A. P. (2020). New Design of Solar Photovoltaic and Thermal Hybrid System for Performance Improvement of Solar Photovoltaic. *International Journal of Photoenergy*, 2020, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2020/8825489>
11. Azimi-Nam, S., & Farhani, F. (2017). Effect of Temperature on Electrical Parameters of Phosphorous Spin-on Diffusion of Polysilicon Solar Cells. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 4(1), 41–45. https://www.jree.ir/article_70105_08c49abfb6019aa4d7f0c12b508a998d.pdf.
12. *How Temperature Impacts Solar Cell Efficiency - Solar N Plus*. (2024, 2 червня). Solar N Plus. <https://www.solarnplus.com/how-temperature-impacts-solar-cell-efficiency/>
13. *Sensornyj kalibrator-mul'tymetr 6,5 rozrjadiv Keithley 2450. (b. d.). Tekhenkom – vymirjuvaljni prylady ta obladdannja (Ukraina, Kyjiv)*. <https://cutt.ly/SrwPyzzf>.
14. *Stend laboratornyj "Imitator sonjachnogho elementa" GES-100 OOO "SPEKTRO LAB" - obladdannja dlja laboratorij* <https://spectrolab.com.ua/ua/p1958350888-stend-laboratornyj-imitator.html>
15. *Symuljatory sonjachnogho svitla - TOV «Seltok Fotoniks». (b. d.). TOV «Seltok Fotoniks» - pershyj profesijnij katalog optoelektroniky*. https://seltokphotonics.com/catalog/analytical-laboratory-equipment/solar-simulator/?srsId=AfmBOorZmQG8_bwSqXK-Uk0mEXFjXGg2kWlnXWy1UbNLg4sbTNjevE_u.
16. *Innovaciji v optyци. Sonjachnyj symuljator. (b. d.). Wavelength opto-electronic*. <https://wavelength-oe.com/uk/innovation-in-optics-solar-simulator/>.

Olena Holyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Zhesan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Korsikov Oleksandr**, **Nerush Oleksandr**; *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Methodology for Studying the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells in Artificial Conditions

The efficiency and productivity of converting solar energy into electricity using photovoltaic converters is significantly affected by the ambient temperature. That is, the ability of a photovoltaic cell to convert sunlight into electricity is most significantly affected by the operating temperature of the cell. And as a result, this affects the energy efficiency of solar-based power supply systems. Temperature has the greatest effect on the short-circuit current and open-circuit voltage of a photovoltaic cell. With increasing temperature, the open-circuit voltage can decrease significantly, and the short-circuit current increases slightly. However, the overall change in these parameters leads to a decrease in the maximum output power of the photovoltaic cell. Currently, there are no universal methods for regulating the impact of ambient temperature on photovoltaic systems. Therefore, for the correct design and installation of photovoltaic systems, it is necessary to pre-model their operation, ensuring the maximum possible range of optimal temperatures. During modeling, it is advisable to study the current-voltage characteristics and spectral characteristics of the photovoltaic cell. The purpose of the article is to analyze the methods and means of constructing and studying the current-voltage characteristics of silicon photovoltaic cells under different conditions of changing illumination and ambient temperature.

To achieve this goal, the article proposes a structure for a measuring instrument installation for studying the current-voltage characteristics of photovoltaic cells in laboratory conditions. The installation should include: a solar radiation simulator, a cryostat, a calibrator-multimeter, a temperature controller, and a personal computer with appropriate software. Using a solar radiation simulator, the surface of the photovoltaic cell must be irradiated with different intensities and illumination. In this case, adjustments can be made using spectral filters. During simulation, measurements must be constantly performed for the entire current-voltage characteristic. The presence of a temperature control system (cryostat) in the circuit makes it possible to provide conditions for changing the ambient temperature. In addition, the installation includes a device for smoothly adjusting the distance between the sample and the solar radiation simulator. A calibrator-multimeter is used to generate and measure current, voltage, and resistance. The article presents a diagram of the heterostructure of a silicon photovoltaic cell.

Since the current-voltage characteristic of a photovoltaic cell has an s-shaped bend, which creates a potential barrier between the zones of the main charge carriers, during modeling it is necessary to achieve such optimal values of temperature and illumination at which the height of the potential barrier will change and, as a result, it will be possible to get rid of the s-shaped bend of the current-voltage characteristic of the photovoltaic cell. The results of such modeling can later be used in the design at the initial stage of installation of power supply systems based on solar energy.

solar cell, volt-ampere characteristic, spectral range, temperature, current

Одержано (Received) 28.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 07.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

С. Г. Ковальов, канд. пед. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: kovalyovserggr@ukr.net

Оптимізація часу виробництва за допомогою методу навчання з підкріпленням як частинний випадок підвищення ефективності автоматизованих виробничих ліній

У статті розглянуто застосування методу навчання з підкріпленням для оптимізації часу роботи автоматизованої виробничої лінії. Лінія моделюється у вигляді графу, де вершини представляють обладнання, здатне виконувати одну або кілька виробничих операцій. Такий підхід дозволяє не лише будувати точну модель середовища функціонування агента, але й реалізовувати комп'ютерну симуляцію, що слугує основою для аналізу ефективності методів навчання з підкріпленням. Завдяки симуляціям оцінюється можливість інтеграції цих методів у реальні виробничі лінії з метою підвищення їхньої ефективності, оптимізації використання ресурсів та забезпечення надійності функціонування.

виробнича лінія, оптимізація ефективності використання, штучний інтелект, час виробництва, моделювання лінії як системи, графи станів

Постановка проблеми. Підвищення ефективності використання сучасного виробництва в цілому та його виробничих ліній зокрема, передбачає оптимізацію таких складових ефективності як: час виробництва одиниці продукції, затрати ресурсів на виробництво, обсяг виробництва (кількість одиниць продукції, які виготовляються за одиницю часу), коефіцієнт використання обладнання (частка часу коли обладнання використовується на виробництво), надійність виробництва. Надійність має власні складові зокрема: довговічність (тривалість експлуатації елемента без поломок), середній час між поломками (середній час між випадковими поломками), час відновлення після поломки, збережувальність (легкість та швидкість обслуговування обладнання).

Кожна конкретна задача по оптимізації ефективності та надійності для конкретної виробничої лінії має на меті оптимізацію відповідних складових, що свідчить про необхідність формування єдиного підходу для оптимізації кожного з цих компонентів. Зважаючи на це можна розробити універсальні методи, які забезпечать досягнення високої ефективності у різних виробничих середовищах, незалежно від специфіки їх функціонування.

Задачі по визначенню універсальних методів для оптимізації часу виробництва як складової ефективності виробничих ліній є складними і потребують ретельного моделювання виробничих ліній. Застосування методів штучного інтелекту (ШІ) до зазначених моделей є особливо актуальним, оскільки вони представляють собою потужні інструменти, здатні ефективно вирішувати задачі такого характеру. Методи ШІ мають ознаки універсальності та адаптивності, що дозволяє створювати загальні підходи для оптимізації різних виробничих ліній, враховуючи їхні унікальні характеристики та потреби. Це робить штучний інтелект особливо цінним у контексті досягнення високої ефективності виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у сфері оптимізації виробничих процесів за допомогою методів навчання з підкріпленням стали актуальними завдяки зростаючій складності автоматизованих виробничих ліній. Останні роботи у цьому напрямку зосереджуються на моделюванні виробничих систем

як графів, де вершини відповідають вузлам обладнання, а ребра визначають маршрути переходу між операціями. Використання агентів на основі глибокого навчання, зокрема Deep Q-Network (DQN), демонструє значний потенціал для оптимізації маршрутів, мінімізації простоїв та зменшення часу виробництва. Подібні дослідження вже показали свою ефективність у галузях, де необхідна інтеграція складного обладнання з непередбачуваними умовами роботи [1,2,5].

Актуальність таких досліджень визначається сучасними викликами у сфері промислової автоматизації. Зі збільшенням вимог до ефективності та надійності виробництва, традиційні підходи оптимізації часто не відповідають потребам динамічних виробничих середовищ. Методи навчання з підкріпленням дозволяють створювати адаптивні системи, які можуть самостійно вдосконалювати свої стратегії у процесі роботи. Це відкриває нові перспективи для автоматизації, де виробничі лінії не лише виконують завдання, але й адаптуються до змінних умов і складних сценаріїв [3,6,7].

Крім того, дослідження в цій галузі сприяють розвитку індустрії 4.0, яка орієнтована на впровадження інтелектуальних технологій у виробництво. Використання навчання з підкріпленням у поєднанні зі штучним інтелектом та машинним навчанням дозволяє інтегрувати інформаційні та фізичні системи, створюючи «розумні» виробничі процеси. Такі дослідження не лише забезпечують науковий прогрес, але й мають значний вплив на економічний розвиток, сприяючи оптимальному використанню ресурсів, зменшенню витрат і підвищенню продуктивності [8,9].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка ефективних підходів до оптимізації часу виробництва як складової ефективності виробничих ліній за допомогою методів навчання з підкріпленням.

Для реалізації мети розв'язувалися наступні завдання:

1. Дослідження підходу оптимізації виробничих процесів для зменшення часу виконання операцій та мінімізації простоїв.
2. Моделювання впровадження стратегій для підвищення надійності та довговічності виробничих вузлів.
3. Розвиток нових методологій та технологій для управління та оптимізації виробничих ліній на основі сучасних досягнень в галузі ШІ.

Викладення основного матеріалу. Використання методу навчання з підкріпленням (НП) є особливо перспективним підходом для реалізації завдань по оптимізації ефективності використання виробничих ліній. Метод НП може бути реалізований у вигляді комп'ютерної програми, що інтегрована у виробничу лінію.

Метод НП передбачає функціонування програми-агента (далі агента) в межах певного середовища. Взаємодія агента з середовищем відбувається циклічно. Схематично один життєвий цикл взаємодії агента з середовищем показано на рис. 1.

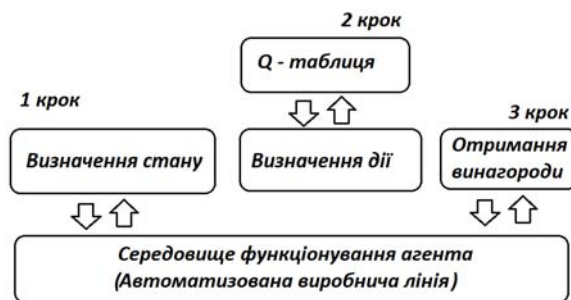


Рисунок 1 – Життєвий цикл агента в середовищі

Джерело: розроблено автором

На першому кроці циклу (рис. 1) агент взаємодіє із середовищем і визначає свій стан. У задачі оптимізації ефективності використання автоматизованої виробничої лінії середовищем є сама лінія, а її стан визначається як стан агента.

Другий крок передбачає визначення множини дій, які агент може виконати в конкретному стані. Це реалізується через взаємодію з Q-таблицею або нейронною мережею (НМ), що виконує функції Q-таблиці. Цей підхід відомий як глибоке навчання з підкріпленням (Deep Q-learning, DQN), коли функції Q-таблиці реалізовано через відповідну НМ.

На основі програми-політики (далі — політика) агент обирає із Q-таблиці одну дію і виконує її.

На третьому кроці циклу агент отримує винагороду від середовища за виконану дію. Тимчасові винагороди, отримані після кожного циклу, накопичуються та зазвичай сумуються. Ця сума розглядається як довготривала винагорода за діяльність агента в середовищі. Саме довготривала винагорода використовується в алгоритмі навчання з підкріпленням для корекції параметрів Q-таблиці та реалізації оптимізації функціонування агента в середовищі.

Для розширення можливостей оптимізації методом навчання з підкріплення (НП) та представлення автоматизованої виробничої лінії як середовища, необхідно виконати коректне моделювання лінії, адаптоване для функціонування агента.

Розглянемо модель автоматизованої виробничої лінії, представлену у вигляді графа. У такому підході вершини графа відповідають обладнанню лінії або її вузлам, які можуть виконувати одну чи декілька виробничих операцій. Кожна вершина графа характеризується низкою параметрів, що відображають специфіку задачі оптимізації ефективності виробничої лінії і у випадку оптимізації часу виробництва це: середній час виконання операції, час простою обладнання, час налаштування, середній час очікування між операціями, а також номери виробничих операцій відповідно до їхньої послідовності у виробничому циклі. Для надійності вузлів враховуються довговічність, середній час між поломками, час відновлення та збережуваність.

Для перевірки запропонованої ідеї було проведено комп'ютерну симуляцію оптимізації часу виробництва на основі алгоритму DQN. Для реалізації комп'ютерної симуляції використано мову програмування Python та її бібліотеки numpy, tensorflow, matplotlib.pyplot.

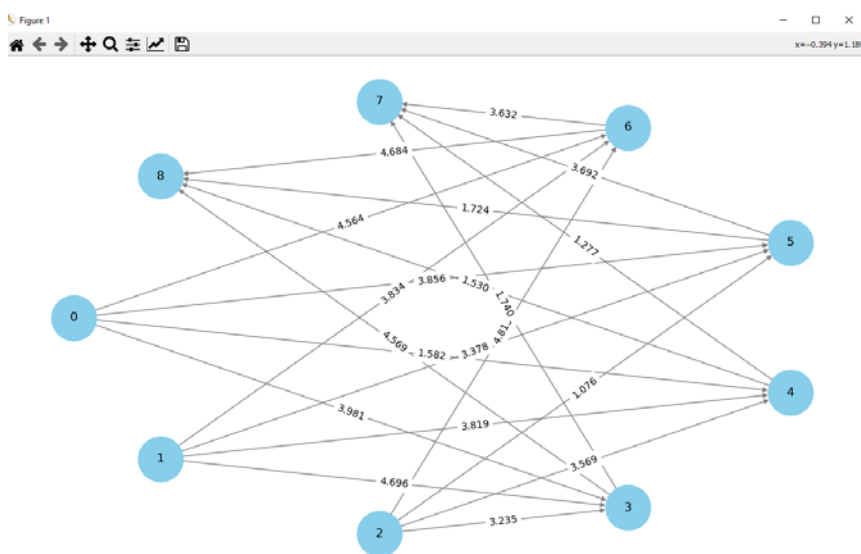


Рисунок 2 – Граф автоматизованої лінії для комп'ютерної симуляції оптимізації часу виробництва

Джерело: розроблено автором

Реалізація комп'ютерної симуляції оптимізації часу виробництва передбачала наступні етапи: підготовка вхідних даних, реалізація симуляції середовища, побудова агента DQN, реалізація алгоритму навчання, оцінка ефективності. Повний код симуляції є об'ємним і тому його наведення в рамках публікації не є доречним.

Етап підготовки вхідних даних передбачав симуляцію лінії з 8 виробничих вузлів відповідно: 3 вузли для 1-ї операції, 4 вузли для 2-ї операції та 2 вузли для 3-ї операції. В результаті середовище автоматизованої виробничої лінії представлено графом з рис. 3.

Фрагмент коду опису типів об'єктів для представлення виробничих операцій та верши графа:

```
# Клас для опису вузлів графа
class Node:
    def __init__(self, operations, longevity_mean, mtbf_mean, recovery_mean,
reliability_mean):
        self.operations = operations # Масив об'єктів Operation
        self.longevity_mean = longevity_mean # Середнє значення довговічності
        self.mtbf_mean = mtbf_mean # Середній час між поломками (Mean
Time Between Failures)
        self.recovery_mean = recovery_mean # Час відновлення
        self.reliability_mean = reliability_mean # Збережуваність

    # Метод для обчислення поточних параметрів надійності вузла
    def compute_reliability_params(self, current_time):
        longevity = np.random.lognormal(mean=np.log(self.longevity_mean),
sigma=0.5)
        mtbf = np.random.normal(loc=self.mtbf_mean, scale=5)
        recovery = np.random.normal(loc=self.recovery_mean, scale=1)
        reliability = np.random.normal(loc=self.reliability_mean, scale=0.02)

        print(f"Time={current_time}: Longevity={longevity:.2f}, MTBF={mtbf:.2f}, "
f"Recovery={recovery:.2f}, Reliability={reliability:.2f}")

        return {
            "longevity": longevity,
            "mtbf": mtbf,
            "recovery": recovery,
            "reliability": reliability
        }
```

Джерело: розроблено автором

Симуляції середовища передбачає створення відповідного класу Production Environment. Цей клас передбачає список дій, станів, винагород та покарань агента.

Дії агента:

1. Виконання операції за нормальних умов:
 - Операція виконується у вузлі, стан якого "working".
 - Час виконання операції скорочується (знижується на 10%).
2. Зупинка вузла для планового ТО:
 - Вузол переходить у стан "planned_maintenance".
 - Дія спрямована на обслуговування вузла, після якого він повертається в робочий стан.
3. Зупинка вузла в результаті аварії (ремонт):
 - Вузол переходить у стан "repairing".
 - Аварія вимагає часу на ремонт перед поверненням у робочий стан.
4. Зупинка вузла для простою:
 - Вузол переходить у стан "idle".
 - Причиною простою є, наприклад, очікування матеріалів.
5. Ігнорування планового ТО (продовження роботи):

- Вузол залишається в стані "working", навіть якщо настав час ТО.
- Це може підвищити ймовірність аварії або передаварійного стану.

Стан вузлів:

1. Робочий стан ("working"):

- Вузол працює та виконує операції без проблем.

2. Підходить час планового ТО ("planned_maintenance"):

- Вузол перебуває у стані технічного обслуговування.

3. Передаварійний стан ("pre_failure"):

- У вузлі спостерігається підвищений ризик аварії (можливий перехід в "failure").

4. Аварія ("failure"):

- Вузол зупинений через поломку та потребує ремонту.

5. Ремонт ("repairing"):

- Вузол ремонтується після аварії.

6. Простій ("idle"):

- Вузол простоює, очікуючи на матеріали або через зупинку попередніх вузлів у графі.

Винагорода та покарання:

1. Виконання операції за нормальних умов:

- *Винагорода*: Негативна величина часу виконання операції, наприклад, - *current_time*. Чим коротший час, тим більше значення винагорода (враховується оптимізація часу).

2. Планове ТО:

- *Штраф*: -3 за час, витрачений на обслуговування вузла.

3. Аварія (ремонт):

- *Штраф*: -10 за аварію.

- Витрачається додатковий час на ремонт (збільшення часу виконання операцій).

4. Простій:

- *Штраф*: -2 за кожен крок у стані "idle".

5. Ігнорування планового ТО:

- Прямої винагороди чи штрафу немає, але підвищується ймовірність:

- Передаварійного стану ("pre_failure").

- Аварії ("failure") із подальшими штрафами.

6. Передаварійний стан:

- *Штраф*: -5, якщо вузол переходить у стан "failure".

- *Винагорода*: Відсутня, якщо вузол успішно повертається до "working".

Етап створення агента передбачав використання Q-функції, аналітичне представлення якої має наступний вигляд:

$$Q(s_t, a_t) = r_t + \gamma \max Q(s_{t+1}, a') \quad (1)$$

де: r_t - винагорода, отримана на поточному кроці,

γ - фактор дисконтування, який визначає вагу майбутніх нагород ($0 \leq \gamma \leq 10$),

$\max Q(s_{t+1}, a')$ - максимальне значення Q-функції для наступного стану s_{t+1} , враховуючи всі можливі дії a' .

Для коригування ваг нейронної мережі під час навчання застосовувалась функція-втрат, яка має наступний вигляд:

$$L = E((Q_{target} - Q(s_t, a_t))^2) \quad (2)$$

де: L – функція втрат

E – математичне сподівання значень функції втрат,

Q_{target} - цільове значення Q-функції,
 $Q(s_t, a_t)$ - поточне передбачення Q-функції.

На сам кінець критерій ефективності функціонування агента, а відповідно і реалізації оптимізації часу виробництва розраховувався за формулою:

$$E = \frac{T_{\text{base}} - T_{\text{DQN}}}{T_{\text{base}}} 100\% \quad (3)$$

Де E – критерій ефективності,

T_{base} – загальний час виробництва без оптимізації використовується як базова точка відліку, щоб обчислити відсоткове поліпшення,

T_{base} – час виробництва з оптимізацією.

В результаті проведення комп'ютерної симуляції згідно критерію (3) було отримано наступну залежність для помилки функціонування нейронної мережі в межах алгоритму агента, для DQN навчання:

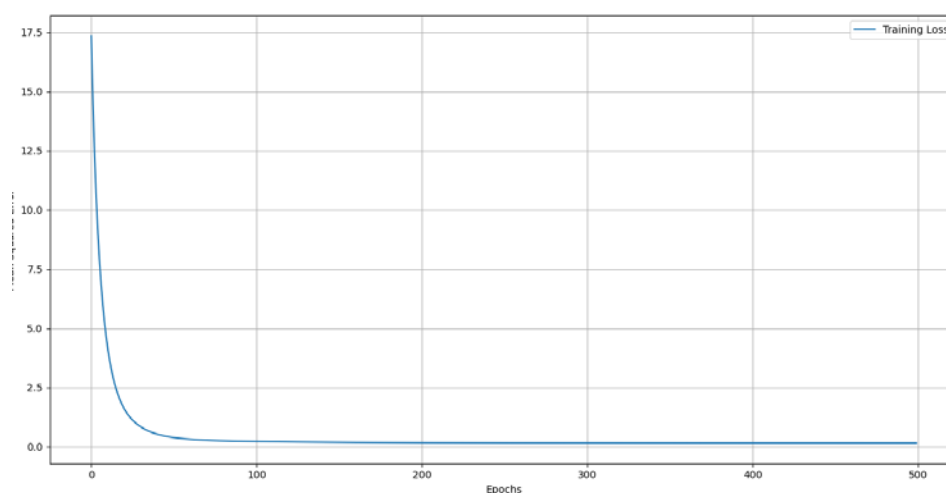


Рисунок 4 – графік мінімізації помилки для обчислення Q-значень

Джерело: розроблено автором

Отримана залежність вказує на позитивний ефект застосування алгоритму НП для оптимізації ефективності використання автоматизованої виробничої лінії в контексті оптимізації її часу виробництва.

Висновки

1. У висновках статті було підкреслено, що запропонований підхід до оптимізації виробничих процесів виявився ефективним для досягнення поставлених цілей. Дослідження підтвердило, що застосування сучасних методів навчання з підкріпленням дозволяє значно зменшити час виконання операцій і мінімізувати простій, що забезпечує суттєве підвищення продуктивності автоматизованих виробничих ліній.

2. Завдяки моделюванню стратегій оптимізації вдалося створити умови для підвищення надійності та довговічності окремих виробничих вузлів. Отримані результати демонструють, що інтеграція інтелектуальних алгоритмів у виробниче середовище дозволяє забезпечити стійкість систем до змінних умов та складних сценаріїв функціонування.

3. Загалом, проведена робота зробила вагомий внесок у розвиток методологій та технологій управління виробничими лініями, використовуючи досягнення в галузі штучного інтелекту. Отримані результати не лише відкривають перспективи подальших досліджень, але й сприяють розробці більш адаптивних, ефективних та надійних систем автоматизації виробництва.

Список літератури

1. Neves M., Vieira M., Neto P. A study on a Q-Learning algorithm application to a manufacturing assembly problem. *Journal of Manufacturing Systems*. Issue 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 с/х 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. 428с.
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, 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, 227–232.
6. Ha D. Reinforcement learning for improving agent design. *Artificial life*. 2019. Т. 25, № 4. С. 352–365. URL: 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. Т. 73, № 3. С. 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 та ін. *Advanced robotics*. 2020. Т. 34, № 13. С. 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. Т. 15, № 5. С. 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 та ін. *Neural computing and applications*. 2019. Т. 32, № 18. С. 14311–14320. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04180-2>.
11. Reinforcement learning / B. L. Moore та ін. *Anesthesia & analgesia*. 2011. Т. 112, № 2. С. 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 та ін. *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2022. Т. 162. С. 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 та ін. *EURASIP journal on wireless communications and networking*. 2021. Т. 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 та ін. 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 технікасьогодні» (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): журнал. 2024. №6(34) 2024. С. 1131. 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*, 59, 426–440.
2. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Lysenko, S. V., & Holub, D. V. (2019). Synergetics of improving machine reliability using Markov process models. In *Proceedings of the V All-Ukrainian Scientific-Practical Conference "Perspectives and Trends in the Development of Structures and Technical Service of Agricultural Machines and Tools"* (pp. 242–245). Zhytomyr Agricultural Technical College [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Holovaty, A. O., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Kuzyk, O. V., & Tykhyi, A. A. (2020). Methodological foundations of design and operation of intelligent transportation and manufacturing systems. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
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, 47824–47844. doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978978.
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, 227–232.
6. Ha, D. (2019). Reinforcement learning for improving agent design. *Artificial Life*, 25(4), 352–365. https://doi.org/10.1162/artl_a_00301.

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), 522–540. <https://doi.org/10.1111/bmsp.12199>.
8. Sun, S., et al. (2020). Inverse reinforcement learning-based time-dependent A* planner for human-aware robot navigation with local vision. *Advanced Robotics*, 34(13), 888–901. doi.org/10.1080/01691864.2020.1753569.
9. L. A. P., & Fu, M. C. (2022). Risk-sensitive reinforcement learning via policy gradient search. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 15(5), 537–693. <https://doi.org/10.1561/22000000091>.
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), 14311–14320. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04180-2>.
11. Moore, B. L., et al. (2011). Reinforcement learning. *Anesthesia & Analgesia*, 112(2), 360–367. <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31820334a7>
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*, 162, 102712. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102712>.
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). doi.org/10.1186/s13638-021-01939-x.
14. Jesus, J. C., et al. (2019). Deep deterministic policy gradient for navigation of mobile robots in simulated environments. In *Proceedings of the 2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Belo Horizonte, Brazil. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icar46387.2019.8981638>.
15. Kovalev, S. G., & Kovalev, Yu. G. (2024). Features of implementing an artificial neural network model using hardware. *Nauka i Tekhnika Sohodni*, 6(34), 11–31. [doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)) [in Ukrainian].

Serhii Kovalov, PhD ped. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Optimization of Production Time using the Reinforcement Learning Method as a Particular Case Of Improving the Efficiency of Automated Production Lines

This article examines the application of reinforcement learning methods to optimize the production time of an automated production line modeled as a graph. In this graph representation, nodes correspond to pieces of equipment capable of performing one or multiple manufacturing operations. Such an approach not only creates a precise model of the agent's operating environment but also enables the implementation of computer simulations. These simulations serve as a critical foundation for assessing the potential effectiveness of reinforcement learning methods in optimizing real-world production lines. By adopting this approach, the study explores opportunities to improve efficiency, optimize resource utilization, and enhance the reliability of production systems.

A key focus of the article is the detailed investigation of the stages involved in the computer simulation of production time optimization. The simulation process consisted of several integral stages: preparation of input data, design and implementation of the simulation environment, construction of a Deep Q-Network (DQN) agent, execution of the learning algorithm, and evaluation of optimization efficiency. These stages are thoroughly analyzed, demonstrating the systematic approach required to integrate reinforcement learning into manufacturing processes.

The research also emphasizes the advantages of modeling the production line as a graph, highlighting how it enables the simulation of dynamic and complex production environments. This graph-based framework provides the agent with a structured understanding of equipment connectivity and operational constraints, allowing it to develop effective decision-making policies. Through iterative interactions with the environment, the DQN agent identifies optimal production sequences, minimizes downtime, and enhances throughput.

Furthermore, the article explores the practical implications of integrating reinforcement learning into industrial applications. Computer simulations not only validate the feasibility of these methods but also provide insights into their scalability and adaptability to diverse manufacturing scenarios. The findings underscore the potential of reinforcement learning to transform automated production lines into more intelligent, adaptive, and resilient systems.

By addressing both theoretical and practical aspects, the study lays the groundwork for future research in applying artificial intelligence to industrial automation. This comprehensive approach enables stakeholders to better understand the value of advanced learning algorithms in boosting operational efficiency and ensuring sustainable growth in automated production.

production lines, optimization of utilization efficiency, artificial intelligence, production time, modeling the line as a system, state graphs

Одержано (Received) 14.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 331.45:631.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.206-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.206-212)

О. Д. Деркач¹, доц., канд. техн. наук, Д. О. Макаренко¹, доц., канд. техн. наук,
С. П. Дмитрюк¹, В. Л. Горобець¹, д-р техн. наук, О. М. Лівіцький², канд. техн. наук.,
Д. О. Дяченко²

¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: addsau@gmail.com

Охорона праці при експлуатації безпілотних мобільних автономних платформ в агропромисловому виробництві

Наведено аналіз стану питання щодо безпеки експлуатації безпілотних мобільних автономних платформ. Показано, що в Україні на даний момент не розроблено заходів з охорони праці при роботі з такими агрегатами. В даній роботі розроблено ключові вимоги з питань охорони праці при експлуатації безпілотних мобільних автономних платформ, а саме агророботів.

охорона праці, безпілотна мобільна автономна платформа, GPS-навігація, агроробот, критерії безпеки праці

Постановка проблеми. Злочинне вторгнення росії в Україну спричинило такі масштаби катастрофи, з наслідками яких сьогодні не можуть справитися будь-які міжнародні організації та фонди. Це стосується і аграрного виробництва, яке потерпає від здорожчання логістики, зменшення кількості людських ресурсів, обмеження доступу до енергоносіїв та ринків збуту. Менше з тим, Україна залишається потужним постачальником продовольства на світовий ринок, навіть тимчасово втративши доступ до майже 20 % своїх с.-г. угідь. Очевидно, що після закінчення бойових дій, на розмінованих та очищених від канцерогенів полях поряд із традиційними енергетичними засобами будуть застосовуватись і безпілотні мобільні автономні платформи (БМАП). Використання БМАП буде зумовлене, по-перше, дефіцитом механізаторів; по-друге – їх застосування забезпечить безпеку здоров'я та/або навіть життя механізаторів, адже навіть на допущених Державною службою України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) до використання полях буде існувати імовірність натрапляння на боєприпас чи його залишки; по-третє, БМАП забезпечать вищу продуктивність технологічних операцій. Слово "автономна" було додано виробниками таких засобів, як ознака того, що такі БМАП можуть працювати самостійно будь-де, де є доступ до інтернету та сигналу GPS, повністю виконуючи поставлене завдання, наприклад, в карті припису.

В Україні проводяться тестові випробування безпілотних тракторів компаній John Deere, CNH, CLAAS. Так, John Deere розробив автономний трактор на базі моделі 8R, оснащений GPS-навігацією та шістьма відеокамерами для забезпечення точного руху та безпеки. Ця система дозволяє трактору самостійно виконувати польові роботи без участі оператор [1]. Бренд Case IH розробив автономний концепт-трактор Magnum ACV, який був представлений на міжнародній виставці SIMA та отримав срібну нагороду за інновації [2].

CLAAS проводить дослідження та випробування автономних систем для своїх тракторів, прагнучи інтегрувати безпілотні технології у свою продукцію. Хоча

конкретні моделі безпілотних тракторів від CLAAS ще не представлені, компанія активно інвестує в цю сферу [3]. Однак, ця техніка має класичну конструкцію, притаманну тракторам, як таким. Іншу концепцію БМАП представила компанія SEED MASTER, яка згодом буда викуплена корпорацією RAVON – це аграрний робот OMNiPower (рис.1). Як бачимо, даний енергетичний засіб не має кабіни, органів керування та інших класичних засобів управління. OMNiPower оснащений дизельним двигуном Perkins та може агрегатуватись із сільськогосподарськими машинами виробництва SEED MASTER: сівалкою, розкидачем мінеральних добрив та обприскувачем. Керується БМАП дистанційно за допомогою спеціального планшета зі встановленим програми забезпеченням.



Рисунок 1 – Безпілотна мобільна автономна платформа: агроробот OMNiPower

Джерело: розроблено [4]

Варто зазначити, що впровадження безпілотних енергетичних засобів стикається з певними викликами, такими як відсутність уніфікованих стандартів та нормативної бази. Очікується, що в Європейському Союзі відповідні стандарти будуть розроблені не раніше 2027 року [4].

Незважаючи на те, що безпілотні трактори мають значний потенціал для трансформації сільського господарства, їх широкомасштабне впровадження потребує подальших досліджень, випробувань та розробки відповідних нормативних актів. Особливо це стосується нормативно-правових актів з охорони праці та безпеки праці при експлуатації таких агрегатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На жаль, на даний момент існує вкрай обмежена кількість публікацій, які безпосередньо розглядають питання охорони праці при експлуатації безпілотних систем у сільському господарстві. Так у статті [5] розглядаються перспективи впровадження безпілотних тракторів у сільське господарство, а також питання безпеки їх експлуатації. Але будь-яких досліджень за темою статті проведено не було. В роботі [6] наведено аналіз використання безпілотних тракторів у сільському господарстві та піднято питання безпеки їх застосування. Наголошується, що "створення технології, яка залишається безпечною у всіх сценаріях, де може статися збій, потребує багато програмування та часу. Що стосується виявлення руху, трактори мають датчики, щоб зупинити їх, якщо вони виявляють об'єкти на своєму шляху, такі як люди, тварини, транспортні засоби або інші великі об'єкти" [5, с. 328]. Однак, авторами не запропоновані будь-які заходи, направлені на підвищення безпеки праці, а лише присутня констатація факту. Експлуатація таких систем не вважається безпечною. В роботі [7] акцентовано, що автономна робототехніка і мехатронні механізми [11-15] буде стимулювати ініціативи щодо забезпечення безпеки її експлуатації. У статті обговорюються соціальні наслідки, оцінка та управління ризиками, стандарти та державні постанови, а також охорона

праці при впровадженні безпілотних мобільних автономних платформ в сільське господарство. І, насамкінець, автори в роботі [8] доводять, що сьогодні існують "перешкоди для впровадження безпілотних машин у сільське господарство, зокрема невизначеність щодо правил безпеки та захисту даних". Проте, на момент написання статті, безпекові ініціативи не стали законодавчими актами і достеменно не розроблені для БМАП.

Метою роботи є обґрунтування критеріїв безпеки при експлуатації безпілотних мобільних автономних платформ в агропромисловому виробництві.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленого завдання було досліджено фактичні виникнення аварійних ситуацій, випадки відхилення від технологічних завдань БМАП. В якості об'єкту досліджень обрали БМАП-агроробот OMNiPower виробництва RAVON, у подальшому цю систему будемо називати його агроробот OMNiPower. Як було вказано вище, це БМАП нової конструктивної концепції. Для виконання технологічної операції в його бортовому комп'ютері завантажується карта припису і агрегат починає реалізацію завдання. Місцеположення він визначає за координатами в системі GPS. Має автономні камери, які інформують про ситуацію попереду агрегату та убезпечують наїзд на перешкоди, у разі відсутності сигналу GPS. Якщо до поля відстань велика, агрегат транспортується, як звичайний габаритний вантаж згідно правил дорожнього руху (рис. 2).



Рисунок 2 – Транспортування агроробота OMNiPower дорогою загального користування до місця виконання технологічної операції (Канада)

Джерело: розроблено [4]

Технологічна наладка, заправка технологічними матеріалами відбувається аналогічно, як і при застосуванні традиційних агрегатів. У подальшому, робот рухається по технологічних лініях навігації. Розвороти, переїзди здійснюються в автономному режимі. Контроль за процесом здійснюється дистанційно з будь-якої точки планети, де є доступ до інтернет. Аналіз можливостей функціонування БМАП та зазначена виробником RAVON агророботу OMNiPower специфіка його використання [9] дали можливість запропонувати наступні пункти безпеки праці при експлуатації:

1. Загальні вимоги безпеки. Правила безпеки при експлуатації агроробота OMNiPower.
2. Вимоги безпеки під час технічного обслуговування БМАП-агроробота OMNiPower.
3. Вимоги безпеки під час транспортування БМАП-агроробота OMNiPower.
4. Безпека праці при виникненні пожежі.

Поряд із загальноприйнятими правилами, можливо навести наступні заходи з безпеки праці, які стосуються саме автономної експлуатації агроробота OMNiPower [10]:

1. Особи, які знаходяться в зоні дії БМАП-агроробота OMNiPower повинні мати знання про можливості і характеристики силової платформи БМАП-агроробота OMNiPower і знарядь.

2. Будьте в курсі вашого оточення в полі чи поблизу БМАП-агроробота OMNiPower в будь-який час.

3. Обов'язково маєте оголосити наміри місії/шляху всім особам, що знаходяться у безпосередній близькості від БМАП-агроробота OMNiPower.

4. Переконайтеся, що захисне обладнання встановлено належним чином.

5. Активуйте стан аварійної зупинки під час роботи навколо або під енергетичною платформою чи знаряддям.

6. Не стійте та не знаходьтесь на БМАП-агроробота OMNiPower під час роботи.

Виробник [9] також радить, при експлуатації агроробота OMNiPower не слід знаходитись в кабіні автомобіля чи будь-якого іншого транспорту супроводу. Це необхідно для дотримання більш стійкого зв'язку між планшетом оператора та роботом.

Аналіз джерел [9, 10] не виявив правил з безпеки експлуатації агроробота OMNiPower при отриманні спотвореного сигналу GPS або його зникненні. Не наведені заходи з безпеки праці при виникненні аварійних ситуацій, пов'язаних автономною роботою агрегату. Однак, при експлуатації такого робота на навчальних полях, сталося 5 аварійних ситуацій, коли втрачався зв'язок робота із GPS. Це призводило до відхилення фактичної траєкторії руху від запланованої. Як наслідок, один раз агрегат виїхав за межі поля (рис. 3) та після заїзду в кювет, зупинився. Зупинку агрегату зумовила система нахилу його кута.



Рисунок 3 – Виїзд агрегату за межі виробничої зони поля при зникненні сигналу GPS

Джерело: розроблено авторами на підставі [4]

Слід зауважити, що в той момент проводилося розкидання гранульованих мінеральних добрив. Ширина розкидання 21 м. Але, як видно з рис. 3, агрегат виїхав за край поля. Тобто, він несанкціоновано подолав відстань, довжиною в половину робочої ширини захвату, тобто, більше 10 м. Якщо такий робот буде експлуатуватися в Україні під час воєнного стану, імовірність блокування сигналу GPS є високою. Технічно забезпечення безпечної експлуатації агроробота при зникненні сигналу GPS вирішується налаштуванням бортового комп'ютера на задані дії. Наприклад, при

настанні такого випадку агрегат програмується на зупинку або на доїзд до краю поля на поворотну смугу і зупинку.

Незважаючи на те, що даний агрегат оснащений декількома камерами, які мають забезпечувати автономний контроль за виникненням небезпечних факторів, вони не гарантовано виконують покладені функції. Імовірність неспрацювання їх осататочно не досліджена. Варто звернути увагу, що аналогічні системи вже впроваджені в електромобілях Tesla і могли б в даному агрегаті використовуватись. Фактором ризику може бути неточна карта припису. Наприклад, можна помилково не позначити ухил ділянки поля, щойно утворену штучну перешкоду тощо.

Проведений авторами дослідження свідчать, що при експлуатації агророботів в агропромисловому виробництві в Україні в межах розглянутої концепції мають бути вирішені такі питання:

1. Визначити дозволена відстань експлуатації БМАП від найближчого населеного пункту. Ця відстань буде залежати від імовірності появи сторонньої людини (дитини) в полі, в залежності від відстані до населеного пункту.

2. Сформулювати обов'язкову умову експлуатації БМАП в зоні дії базової станції RTK. Ув'язка системи навігації агроробота OMNiPower зі станцією RTK підвищить точність лінії руху, а оператор буде вчасно отримувати сповіщення про відхилення від траєкторії. Також можливо забезпечити додаткову функцію зупинки БМАП при відхилення від траєкторії на певну величину.

3. Робот OMNiPower дооснащити дистанційним металошукачем. Це необхідно для того, щоб вчасно виявляти можливі металеві уламки, залишки боєприпасів тощо, які, з великою імовірністю, будуть траплятися при експлуатації агрегату на розмінованих полях.

Основні вимоги до експлуатації БМАП в агропромисловому виробництві з охорони та безпеки праці мають бути розроблені та затверджені на законодавчому рівні при експлуатації агророботів в Україні. Вивчення конструкції, технології використання та обслуговування ЕМАП, а також безпеки праці при експлуатації агроробота OMNiPower вже включено в робочу програму з дисципліни "Технології цифрового землеробства" та "Експлуатаційна надійність БМАП в сільськогосподарському машинобудуванні", яка викладається здобувачам другого (магістерського) рівня освіти за спеціальностями "Агроінженерія" та "Галузеве машинобудування".

Висновки

1. Впровадження безпілотних мобільних автономних платформ, а саме агророботів затримується відсутністю уніфікованих стандартів та нормативної бази в Європейському Союзі в Україні. Очікується, що в Європейському Союзі відповідні стандарти будуть розроблені не раніше 2027 року.

2. З'ясовано, що наведені в наукових і популярних статтях, безпекові ініціативи щодо експлуатації безпілотних мобільних автономних платформ і конкретно агророботів не стали законодавчими актами і достеменно немає чітких критерії оцінки безпечної їх роботи.

3. Встановлено, що при експлуатації агророботів в агропромисловому виробництві існують прямі небезпеки у вигляді фізичного з'їзду безпілотних мобільних автономних платформ із запланованої траєкторії.

4. Запропоновано наступні критерії обґрунтованих вимог безпеки праці при експлуатації агророботів OMNiPower: безпечна відстань експлуатації агроробота від населеного пункту; обов'язкова експлуатація в зоні дії RTK-станції; наявність оптичних та хвильових засобів виявлення сторонніх предметів на шляху руху.

Список літератури

1. John Deere анонсував випуск безпілотного трактора. *IAC "Аграрії разом"*. URL: <http://agrarii-razom.com.ua> (дата звернення 15.02.2025).

2. Безпілотні трактори. Коли вихід в поле? *Traktorist.ua*. URL: <http://traktorist.ua> (дата звернення: 15.02.2025).
3. Цифрові рішення від CLAAS. *Claas.com*. URL: <http://claas.com> (дата звернення 15.02.2025).
4. Безпілотні машини поки що не здатні замінити звичайний трактор – дослідження. *SuperAgronom.com*. URL: <http://superagronom.com> (дата звернення: [вказати дату]).
5. Кісь О.В., Мішньов Д.В., Антощенко Р.В., Антощенко В.М. (2022). Безпілотні трактори для сільського господарства. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація»*. Харків: ДБТУ, с. 168-171.
6. Кісь О.В., Сметана А.Ю., Антощенко Р.В., Антощенко В.М. (2023). Безпілотні трактори: перспективи розвитку. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація»*. Харків: ДБТУ, с. 325-328.
7. Автономна робототехніка стимулює ініціативи щодо забезпечення безпеки сільського господарства. *Аграрії разом*. URL: <https://agrarii-razom.com.ua/news-agro/avtonomna-robototehnika-stimulyue-incipiati-vi-shodo-zabezpechennya-bezpeki-silskogo> (дата звернення 15.02.2025).
8. Роботи не зможуть найближчим часом замінити нинішні сільськогосподарські машини – дослідження. Значною перешкодою для впровадження безпілотних машин в агро є невизначеність щодо правил безпеки — дослідження. *SuperAgronom.com*. URL: <https://superagronom.com/news/19311-roboti-ne-zmojut-nayblizhchim-chasom-zaminiti-ninishni-silskogospodarski-mashini--doslidjennya> (дата звернення 15.02.2025).
9. Internal Training: HRI and Manual operation of Dot Power Platform. *SeeDotRun.com*. URL: <http://www.SeeDotRun.com> (дата звернення 15.02.2025).
10. DOT operator's manual 2019. *Farming Reimagined. SeeDotRun.com*. URL: <http://www.seedotrun.com> (дата звернення 15.02.2025).
11. Аулін В.В., Голуб Д.В., Агапоненко М.І. Розробка критерію вдосконалення системи технічної експлуатації засобів транспорту з врахуванням необхідної діагностичної інформації. *Наукові нотатки : міжвуз. зб.* 2018. №62. С.17-20.
12. Аулін В.В., Голуб Д.В. Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочищення автомобіля. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 7(38). Ч.1. С. 167-176.
13. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Розробка математичної моделі мехатронного модуля системи рульового управління вантажних автомобілів. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: V Міжнар. наук.-практ. конф., 19-21 квіт. 2023 р., м. Кропивницький: матеріали конф. / М-во освіти і науки України, Центральнoукраїно нац. техн. ун-тЮ каф. експлуатації та ремонту машин. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С.9-11.
14. Голуб Д.В., Аулін В.В. Математична модель підвищення якості управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля. Кропивницький: ЦНТУ, Вип. 9(40). Ч.2, 2024. С.186-197.
15. Мигаль В.Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Харків: Майдан, 2018. 262 с.

References

1. IAS "Agrarii razom". (2025, February 15). John Deere announced the release of an autonomous tractor. *Agrarii razom*. <http://agrarii-razom.com.ua> [in Ukrainian].
2. Traktorist.ua. (2025, February 15). Autonomous tractors. When will they hit the field? *Traktorist.ua*. <http://traktorist.ua> [in Ukrainian].
3. Claas.com. (2025, February 15). Digital solutions from CLAAS. *Claas.com*. <http://claas.com> [in Ukrainian].
4. SuperAgronom.com. (n.d.). Autonomous machines are not yet able to replace conventional tractors – research. *SuperAgronom.com*. <http://superagronom.com> [in Ukrainian].
5. Kis, O. V., Mishniiov, D. V., Antoshchenkov, R. V., & Antoshchenkov, V. M. (2022). Autonomous tractors for agriculture. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Automobile Transport in the Agricultural Sector: Design, Design, and Technological Operation"* (pp. 168-171). DBTU. [in Ukrainian].
6. Kis, O. V., Smetana, A. Yu., Antoshchenkov, R. V., & Antoshchenkov, V. M. (2023). Autonomous tractors: Development prospects. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Automobile Transport in the Agricultural Sector: Design, Design, and Technological Operation"* (pp. 325-328). DBTU. [in Ukrainian].
7. IAS "Agrarii razom". (2025, February 15). Autonomous robotics stimulates initiatives to ensure agricultural safety. *Agrarii razom*. <https://agrarii-razom.com.ua/news-agro/avtonomna-robototehnika-stimulyue-incipiati-vi-shodo-zabezpechennya-bezpeki-silskogo> [in Ukrainian].
8. SuperAgronom.com. (2025, February 15). Robots will not be able to replace current agricultural machinery anytime soon – research. The uncertainty of safety regulations is a significant obstacle to the introduction of

- autonomous machines in agriculture – research. SuperAgronom.com. <https://superagronom.com/news/19311-roboti-ne-zmojut-nayblijchim-chasom-zaminiti-ninishni-silskogospodarski-mashini--doslidjennya> [in Ukrainian].
9. SeeDotRun.com. (2025, February 15). Internal Training: HRI and Manual Operation of Dot Power Platform. SeeDotRun.com. <http://www.SeeDotRun.com> [in English].
 10. SeeDotRun.com. (2019). DOT operator’s manual. Farming Reimagined. <http://www.seedotrun.com> [in English].
 11. Aulin, V.V., Golub, D.V. & Agaponenko, M.I. (2018). Rozrobka kryteriiu vdoskonalennia systemy tekhnichnoi ekspluatatsii zasobiv transportu z vrakhuvanniam neobkhidnoi diahnostychnoi informatsii. [Development of criteria for improving the system of technical operation of means of transport, taking into account the necessary diagnostic information]. Naukovi notatky : mizhvuz. zb. Scientific notes: an interuniversity collection, 62, 17-20 [in Ukrainian].
 12. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2023). Justification of the mechanism for the functioning of the mechatronic system of car windshield wipers. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 7(38), 167–176. Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
 13. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Zamurenko, A. S. (2023). Development of a mathematical model of the mechatronic module of the steering system for heavy trucks. In Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference on Reliability and Efficiency of Machines, Processes and Systems (pp. 9–11) . Kropyvnytskyi: Ministry of Education and Science of Ukraine, Central Ukrainian National Technical University. [in Ukrainian].
 14. Holub, D. V., & Aulin, V. V. (2024). Mathematical model for improving the quality of management of the mechatronic climate control system in a car cabin. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 9(40), 186–197. Kropyvnytskyi: CNTU. [in Ukrainian].
 15. Myhal, V. D. (2018). Intelligent systems in technical operation of vehicles (Monograph). Kharkiv: Maidan. [in Ukrainian].

Oleksii Derkach¹, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Dmytro Makarenko**¹, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Svitlana Dmytryuk**¹, **Volodymyr Horobets**¹, Dr. tech. Sci., **Oleksandr Livitskyi**², PhD tech. Sci., **Denys Dyachenko**²

¹ Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

² Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Occupational Safety in the Operation of Agro-Robots in Crop Production

This paper provides an analysis of the current state of occupational safety in the operation of unmanned mobile autonomous platforms. It demonstrates that, to date, no specific occupational safety measures have been developed in Ukraine for working with such platforms. The paper also outlines key occupational safety requirements for the operation of unmanned mobile autonomous platforms.

The article asserts that agricultural robots are expected to be implemented in Ukraine in the future. An analysis of occupational safety issues has revealed that, even within the European Union, no standardized regulations for the safe operation of agricultural robots currently exist. It has been established that Ukraine also lacks legislative initiatives to regulate the use of agricultural robots in production settings. A review of the existing literature shows that while some publications address the challenges associated with the safe operation of agricultural robots, no proposals or recommendations have been developed or implemented.

Using the example of the OMNiPower agricultural robot, the paper demonstrates one of five hazardous incidents where the machine deviated from its planned trajectory due to the loss of a GPS signal. The authors propose measures to regulate the operation of agricultural robots in the event of GPS signal loss. Based on their research, they identify the key criteria necessary for developing guidelines and regulations for the safe operation of agricultural robots in Ukraine. The paper concludes with a summary of these findings.

The implementation of agro-robots is currently hindered by the absence of standardized regulations and a unified legal framework. It is expected that the European Union will not develop the relevant standards before 2027. The paper highlights that safety initiatives presented in scientific and popular articles have not been formalized into legislation, and there are no clearly defined criteria for assessing the safe operation of agro-robots. It is demonstrated that the operation of agro-robots involves direct hazards, such as unintended deviations from the planned trajectory. The following criteria are proposed to justify occupational safety requirements: a safe operational distance of the agro-robot from residential areas, mandatory operation within the coverage area of an RTK station, and the use of optical and wave-based detection systems for identifying foreign objects in the robot's path.

labor protection, unmanned mobile autonomous platform, GPS navigation, agricultural robot, labor safety criteria

Одержано (Received) 10.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656:338

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.213-222](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.213-222)

Д. В. Голуб, доц., канд. техн. наук, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук
Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Dimchik529@gmail.com, AulinVV@gmail.com

Удосконалення управління мехатронною системою впорскування двигуна внутрішнього згорання автомобіля

Проаналізовано сучасні методи та технічні рішення, що використовуються в мехатронних системах впорскування паливо-повітряної суміші, з метою зменшення токсичності викидів, покращення динамічних характеристик та економічності роботи двигуна внутрішнього згорання автомобіля. Розглянуто сильні та слабкі сторони резонансного, механічного й газотурбінного підходів до наддуву.

Приділено увагу імпульсному способу наддуву з використанням повітряно-тактових клапанів, який досі не застосовувався в двигунах внутрішнього згорання та зроблено припущення що система впорскування, оснащена пристроєм імпульсного наддуву з повітряно-тактовими клапанами, здатна для існуючих конструкцій бензинових і дизельних двигунів внутрішнього згорання знизити витрату пального, зменшити вміст шкідливих речовин у вихлопних газах і підвищити крутний момент у діапазонах низьких і середніх частот обертання.

Розроблено інтегровану математичну модель, яка об'єднує електричні та механічні компоненти, забезпечує можливість чисельного аналізу динамічних властивостей електромагнітного приводу, а також моделювання керованого об'єкта під час створення методів і алгоритмів роботи системи управління.

Розроблено метод керування швидкодіючим електромагнітним механізмом резонансного типу, який дозволяє забезпечити мінімальну швидкість посадки якоря під заданий час перемикання, навіть за умов зовнішніх збурюючих впливів. Запропоновано варіант створення адаптивної системи керування таким механізмом без використання спеціалізованих датчиків для визначення положення та швидкості виконавчого органу. Особливістю підходу є те, що регулювання кінцевої швидкості посадки якоря здійснюється на основі аналізу характеристик струму та напруги обмоток керування електромагнітним механізмом. Представлено методику визначення початкових параметрів для налаштування алгоритму керування електромагнітом.

мехатронний привід, управління, двигун внутрішнього згорання, система впорскування, структурна схема, електромагнітний механізм, повітряно-тактовий клапан

Постановка проблеми. Автомобільна промисловість є однією з провідних і динамічно розвиваючихся галузей, у якій різні пристрої зі жорстким кінематичним зв'язком поступово замінюються новітніми електронно-керованими системами [1-5]. Цей розвиток відбувається в умовах стрімкого зростання цін на паливно-мастильні матеріали (ПММ) та посилення екологічних проблем, спричинених шкідливими вихлопними газами. Така ситуація стимулює пошук шляхів зниження токсичності та підвищення економічної ефективності роботи двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобілів. У відповідь на ці виклики розробники ДВЗ постійно вдосконалюють ключові елементи двигуна, зокрема газорозподільний механізм, впускний тракт паливної системи та систему відводу відпрацьованих газів. Одним із перспективних підходів до зменшення споживання палива та зниження викидів шкідливих речовин, при цьому суттєво підвищуючи потужність двигуна, є оптимізація складу і швидкості подачі паливно-повітряної суміші. Це досягається за допомогою впровадження електромагнітного впускного повітряно-тактового клапану (ПТК) [7]. Така технологія базується на створенні хвильових ефектів у системі впорскування завдяки швидкому відкриванню та закриванню впускного каналу ПТК під час такту впорскування. Для

цього в кожному циліндрі обладнується спеціальний клапан, яким управляє високошвидкісний електромагніт. З точки зору енергоефективності та динаміки роботи, найбільш перспективними для таких систем є електромагнітні механізми (ЕММ) резонансного типу управління. Вони утворюють разом із пристроєм складну мехатронну систему, здатну забезпечити високу продуктивність і точність роботи [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри великий обсяг науково-технічних публікацій, залишаються невирішеними завдання створення високонадійних і швидкодіючих мехатронних приводів із заданими статичними та динамічними характеристиками, які водночас відповідають вимогам мінімізації масогабаритних параметрів автомобільних систем [2-8]. Найоптимальнішим підходом для досягнення необхідної динаміки електромагнітів в автомобілях із суттєвими масогабаритними обмеженнями є впровадження спеціалізованих мехатронних систем управління [9]. Аналіз існуючих систем та методів управління резонансними електромагнітами демонструє залежність від використання спеціалізованих датчиків, таких як датчики положення, швидкості чи магнітного потоку, що значно ускладнює конструкцію, підвищує її вагу, габарити й вартість, а також негативно позначається на надійності та ефективності роботи системи [5, 7, 9, 10]. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні нових рішень та методів управління швидкодіючими електромагнітними механізмами резонансного типу, які здатні забезпечувати мінімальну швидкість посадки впускного клапана автомобіля в обмежений час перемикання без застосування спеціалізованих датчиків виконавчого органу, навіть за умов зовнішніх впливів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є удосконалення мехатронного приводу управління електромагнітним впускним клапаном автомобільного двигуна внутрішнього згорання, що забезпечує мінімальну швидкість його посадки при заданому часі спрацювання в умовах зовнішніх збурюючих впливів.

Виклад основного матеріалу.

Привід ПТК ДВЗ повинен працювати при частоті обертання двигуна до 3000 об/хв. При великих частотах повітряно-тактовий клапан повинен знаходитися у відкритому стані. Привід ПТК ДВЗ повинен забезпечувати відкриття, закриття та фіксацію клапана в одному з крайніх положень. Час перемикання клапана t_3 має бути менше 4 мс. Для зниження акустичного шуму кінцева швидкість посадки рухливої частини електромагнітного приводу повинна знаходитися в діапазоні $v_3=0,2...0,4$ м/с [8].

Встановлено, що переважні характеристики, з точки зору швидкодії, енергоспоживання і масогабаритних показників, мають ЕММ резонансного типу, в яких малий час спрацювання досягається за рахунок накопиченої кінетичної енергії пружин. При цьому електромагнітні сили потрібні для утримання якоря в крайніх положеннях і компенсації сил протидії (рис.1, 2).

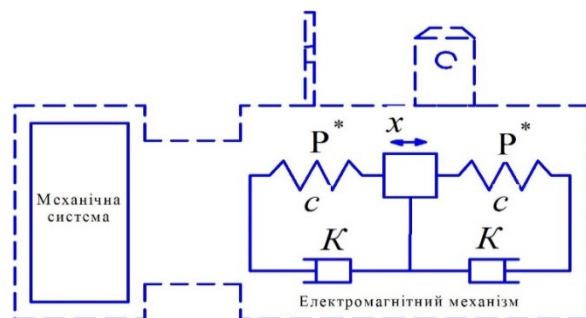
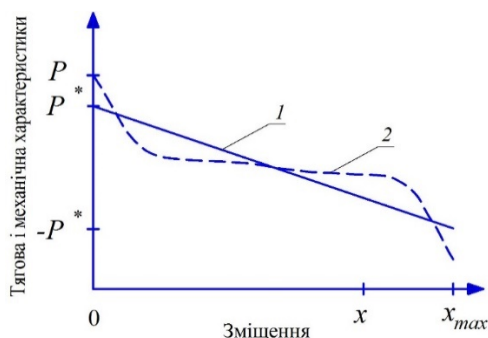


Рисунок 1 - Схема механічної системи та електромагнітного механізму

Джерело: розроблено авторами

ЕММ поворотно-обертальної дії з відповідною конфігурацією магнітопроводу може складатися з одного електромагніту і торсійної пружини. Перемикання з одного

стану в інший здійснюється за допомогою подання імпульсів напруги на обмотки відповідно до власної частоти коливальної системи ЕММ.

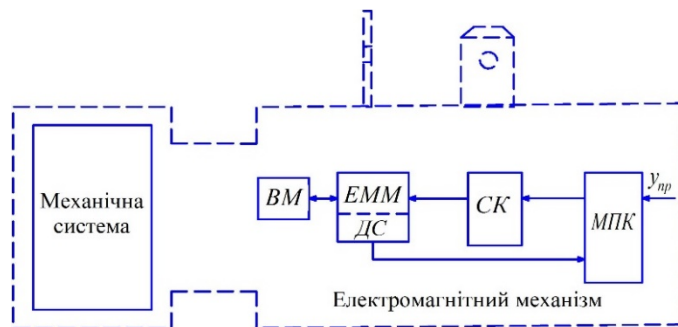


1 - пружина; 2 - електромагнітний механізм

Рисунок 2 - Тягова P і механічна P^* характеристики електромагнітного механізму резонансного типу
Джерело: розроблено авторами

Для забезпечення потрібних динамічних характеристик та утримання якоря в крайніх положеннях в швидкодіючих електромагнітних приводах (ЕМП) резонансного типу використовуються спеціалізовані пристрої управління. Ці пристрої в реальному часі визначають стан виконавчого органу приводу і формують керуючі впливи на обмотки ЕММ [7, 9].

Після огляду та аналізу силових схем управління було обрано схему силового перетворювача, яка дозволяє підвищити енергетичні показники споживання ЕМП з мережі шляхом використання індуктивної енергії обмоток ЕММ. Під час огляду та аналізу методів керування швидкодіючими ЕМП було виявлено, що для досягнення потрібних характеристик в умовах зовнішнього впливу необхідно використовувати спеціалізовані датчики (положення, швидкості, магнітного потоку тощо). Це призводить до ускладнення системи, збільшення розмірних і вартісних показників та зниження надійності системи в цілому. Зважаючи на це, дослідження в даній предметній області потребують подальшого розвитку шляхом створення нових методів управління ЕМП (рис. 3) резонансного типу.



МПК - мікропроцесорний контролер, СК - силовий комутатор, ЕММ - електромагнітний механізм,
ДС - датчики стану, ВМ - виконавчий механізм

Рисунок 3 - Структурна схема мехатронного ЕМП автомобіля

Джерело: розроблено авторами

Ці методи мають забезпечувати мінімальну швидкість посадки клапана за заданий час перемикання без використання спеціалізованих датчиків положення і швидкості виконавчого органу ЕМП в умовах зовнішніх збурюючих впливів, що дозволяють використати єдиний підхід до управління, незалежно від модифікацій його конструкцій.

Вирішення цих завдань вимагає створення математичного апарату для представлення електромеханічних процесів в ЕМП, теплових і електричних процесів в

системі управління і об'єднання їх в єдину модель із-за високої міри і взаємного впливу. Структурна схема математичної моделі, що реалізує управління електромагнітним приводом із заданими динамічними параметрами, приведена на рис. 4.

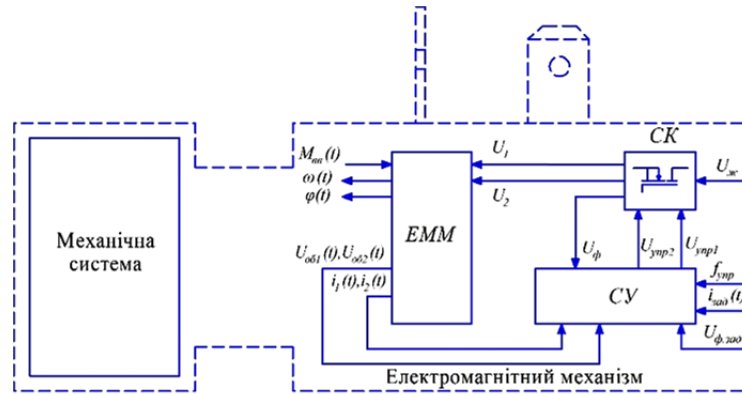


Рисунок 4 - Структурна схема комплексної математичної моделі ЕМП спільно з системою управління
Джерело: розроблено авторами

Вхідними даними мехатронної системи управління є: напруга живлення $U_{жс}$; сигнал управління режимом роботи приводу f_{ynp} ; задана функція зміни струму в обмотці управління від часу перемикання $i_{зад}(t)$; значення напруги форсованого включення приводу U_{ϕ} .

Мехатронна система управління формує сигнали управління U_{ynp1} , U_{ynp2} силовим комутатором в залежності від сигналу управління приводом і його поточного стану. Внаслідок чого подаються сформовані рівні напруги управління приводом U_1 , U_2 на входи відповідних обмоток ЕМП, з виходу перетворювача. В результаті дії прикладеної до обмотки управління напруги відбувається рух якоря електромагніту і на виході блоку формуються миттєві значення струмів в кожній обмотці $i_1(t)$, $i_2(t)$, які є параметрами зворотного зв'язку регулятора.

Математична модель ЕМП являє собою систему звичайних диференціальних (1)-(4) і алгебраїчних (5)-(8) рівнянь та сукупності функцій.

$$U_1(t) = i_1(t) \cdot R_0(1 + \alpha_t \cdot T_1) + \frac{df_{ynp}(i_1, \varphi)}{dt}; \quad (1)$$

$$U_2(t) = i_2(t) \cdot R_0(1 + \alpha_t \cdot T_2) + \frac{df_{ynp}(i_2, \varphi)}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I} (M_{iM1} - M_{iM2} - M_{oM1} - M_{mp} - M_{op} \pm M_{num}); \quad (3)$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}; \quad (4)$$

$$M_{op} = c_{np} \cdot \varphi; \quad (5)$$

$$c_k = \frac{\pi D^4}{32 \cdot l \cdot G(T)}; \quad (6)$$

$$M_{mp} = b_1 + b_2 \cdot (b_3 \cdot \omega)^{\frac{2}{3}}; \quad (7)$$

$$M_{num} = \begin{cases} \frac{I \cdot \omega_0}{t_{num}} \cdot k_{on} \text{ при } |\varphi| = \varphi_{max} ; \\ 0, \text{ при } \varphi_{min} < \varphi < \varphi_{max} \end{cases}; \quad (8)$$

$$M_{op} = f(t); \quad (9)$$

$$M_{EM1} = f(i_1, \varphi); \quad (10)$$

$$M_{EM2} = f(i_2, \varphi); \quad (11)$$

$$U_1(t) = f(U_{ynp1}(t)); \quad (12)$$

$$U_2(t) = f(U_{ynp2}(t)); \quad (13)$$

$$f_{ynp}(t) = \begin{cases} U_{ynp1}(t) = f(i_1, U_2, U_\varphi, i_3, t), U_{ynp2}(t) = f(t), \text{ при } f_{ynp} = \text{"Пуск"}, \\ U_{ynp1}(t) = f(i_1, U_2, U_\varphi, i_3, t), U_{ynp2}(t) = 0, \text{ при } f_{ynp} = \text{"Відкрити"}, \\ U_{ynp2}(t) = f(i_2, U_1, U_\varphi, i_3, t), U_{ynp1}(t) = 0, \text{ при } f_{ynp} = \text{"Закрити"}, \end{cases} \quad (14)$$

де M_{EM1}, M_{EM2} - електромагнітні моменти;

M_{op} - момент опору руху;

M_{onn} - момент опору протидіючої пружини;

M_K - момент контактної взаємодії;

k_{op} - коефіцієнт опору руху;

c_{np} - жорсткість пружин;

c_k - контактна жорсткість;

d_{dk} - коефіцієнт демпфування в контактї;

φ - повітряний проміжок;

$\varphi_{max}, \varphi_{min}$ - максимальний і мінімальний повітряні проміжки;

ω - кутова швидкість;

J - момент інерції;

G - модуль зсуву.

Модель генератора збурюючих впливів та параметр температури довкілля враховує вплив зовнішніх факторів на систему. Математична модель описує процеси в електромагніті та пристроях управління, де час є незалежною змінною, постійно змінюючись. Сімейства статичних характеристик потокозчеплення обмоток і електромагнітного моменту $M(i, \varphi)$ визначаються з рішення задачі розрахунку електромагнітного поля методом кінцевих елементів, для діапазону значень струму і кута повороту якоря.

ЕМП зворотно-поступальної дії, в основі якого закладений принцип пружинно-маятникової механічної системи, в ідеальному випадку повинен забезпечувати кінцеву швидкість $\omega_k = 0$ і час перемикаання, що дорівнює половині періоду власної частоти

$t = \pi \sqrt{\frac{J}{c}}$. В реальних умовах, для компенсації протидіючих моментів і збурюючих впливів, необхідно формувати форму струму $i(t)$ в обмотці ЕММ, щоб забезпечити електромагнітний момент $M_{el}(\varphi) \geq M_{np_o}(\varphi)$, де $M_{np_o}(\varphi)$ - протидіючий момент сил опору (рис. 5).

Закон зміни струму $i(t)$ (рис. 6) призначений для досягнення бажаної динаміки перемикаання ЕМП, враховуючи розрахункові умови, але не враховуючи вплив таких факторів, як технологічні відхилення в параметрах електромагнітного поля, зміни умов експлуатації, зміни моменту опору об'єкта управління тощо.

Для ефективного перемикаання з мінімальною кінцевою швидкістю анкера, необхідно, щоб система управління враховувала зміни зовнішніх сил, які впливають на виконавчий орган приводу, а також коригувала параметри сигналу управління в

залежності від змін температури довкілля та приводу, що впливають на жорсткість пружинної системи.

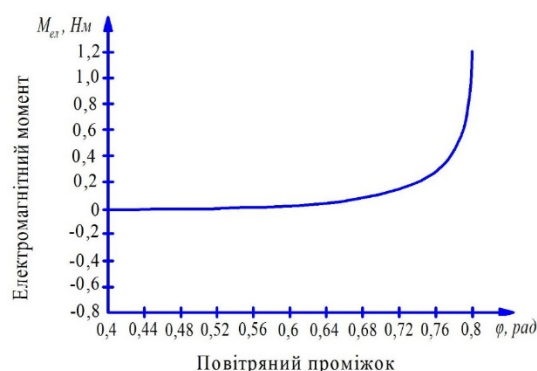


Рисунок 5 - Залежність електромагнітного моменту від кута повороту якоря електромагнітного механізму

Джерело: розроблено авторами

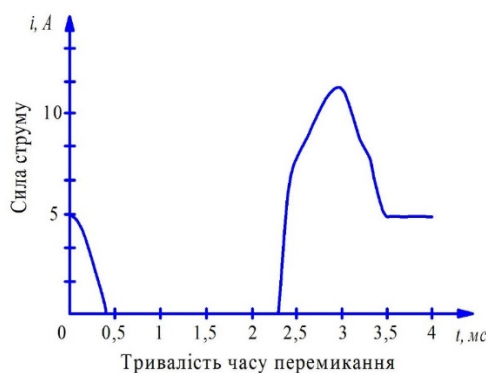


Рисунок 6 - Залежність електромагнітної сили від часу

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів математичного моделювання процесів перемикання дав можливість запропонувати метод управління, який дозволяє побічно визначати просторове положення і величину кінцевої швидкості якоря у момент підходу до полюса в режимі реального часу за характером зміни струму в обмотках, напрузі на них та впливати на швидкість якоря у кінці ходу, що враховує вплив зовнішніх дестабілізуючих чинників.

Запропонований метод заснований на взаємозв'язку електричних процесів, що відбуваються в обмотці електромагнітного приводу з механічними процесами, які обумовлені рухом рухомого елемента магнітної системи та відповідають рівнянню для електричного ланцюга ЕММ:

$$U(t) = i(t)R + \frac{df(i, \varphi)}{dt}. \quad (15)$$

При русі якоря виникає електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції, обумовлена зміною струму в обмотці і проти-ЕРС руху, пов'язана зі зміною робочого повітряного проміжку:

$$U(t) = i(t)R + \frac{df(i, \varphi)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (16)$$

За умов обмеженої максимальної потужності джерела живлення $U_{max}(t)$ виникає зниження струму в обмотці електромагнітного механізму, спричинене рухом якоря. Таке падіння струму дозволяє непрямо оцінити швидкість руху якоря наприкінці його

ходу та може слугувати основою для коригування параметрів процесу в наступному циклі переміщення.

Для регулювання швидкості якоря в межах поточного циклу переміщення запропоновано метод управління, який передбачає створення в обмотці управління електромагнітного механізму такої форми струму (див. рис. 7), що розрахована для режиму навантаження моментом електромагнітного приводу, який відповідає максимальному значенню, здатному забезпечити задані динамічні характеристики.

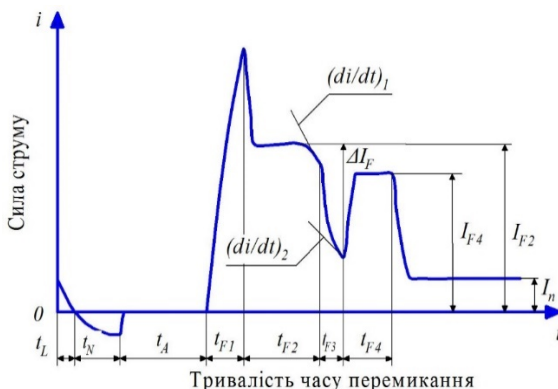


Рисунок 7 - Характер графічного відображення залежності сили струму від часу

Джерело: розроблено авторами

Струм в обмотці ЕММ $i(t)$ (рис. 7) може бути представлений наступними фазами: рушання t_a , некерований рух t_A , форсоване включення t_{F1} , контроль енергії руху якоря t_{F2} , підхід якоря до полюса t_{F3} , підхоплення і утримання якоря t_{F4} . На ділянці t_{F2} струм в обмотці ЕМ $i(t) = I_{F2} = const$, тоді у відповідності з виразом (3) для енергетичного балансу:

$$iU(t)dt = i^2(t)R + i \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} dx, \quad (4)$$

де $i \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} dx$ - енергія руху якоря ЕММ, що викликає зміну похідної струму в

ланцюзі обмотки $\left(\frac{di}{dt}\right)_1$ за умови обмеженої вихідної потужності джерела струму.

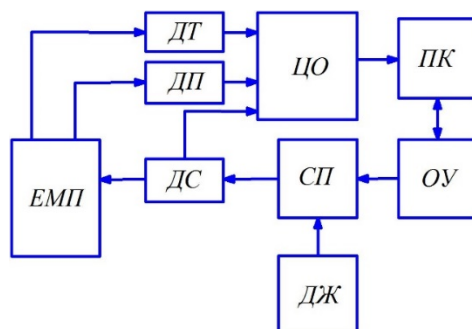
Відстежуючи момент часу $t\left(\frac{di}{dt}\right)_1$ проводиться відключення струму в обмотці і її шунтування. При цьому рівняння електричного ланцюга набирає вигляду:

$$0 = i(t)R + \frac{df(i, \varphi)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (5)$$

За величиною першої похідної струму за часом визначається момент часу підходу якоря до полюса електромагніту $\left(\frac{di}{dt}\right)_2$, після чого, в обмотці формується струм підхоплення I_{F4} і утримання I_h якоря в кінцевому положенні.

На основі запропонованого методу управління за характером струму в обмотці ЕММ та розробленого програмно-апаратного комплексу (рис. 8) отримані результати показали, що він дозволяє забезпечити необхідну швидкість посадки якоря ЕММ при дії зовнішніх збурюючих впливів і без використання спеціалізованих датчиків положення і швидкості виконавчого органу приводу.

Програмно-апаратний комплекс забезпечує реєстрацію залежностей ходу якоря від часу, залежності швидкості переміщення якоря від часу, процесу зміни струму і напруги в обмотці.



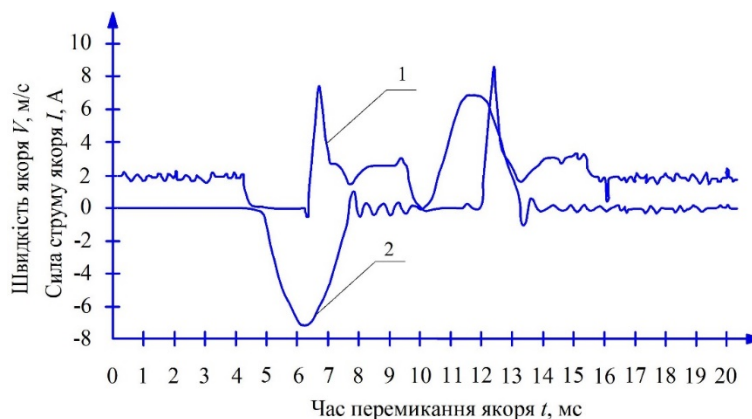
ДЖ - джерело живлення, ОУ - облаштування управління, СП - силовий перетворювач, ДС - датчик струму, ЕМП - електромагнітний привід, ПК - персональний комп'ютер, ДП - датчик положення, ДШ - датчик швидкості, ЦО - цифровий осцилограф

Рисунок 8 - Структурно-функціональна схема програмно-апаратного комплексу визначення початкових параметрів струмової характеристики управління ЕМП

Джерело: розроблено авторами

Основними елементами комплексу є випробувальний стенд на базі чотирьох циліндрового ДВЗ HYUNDAI 1,6 L 120л.с., персональний комп'ютер (ПК), лазерна установка вимірювання лінійної швидкості і переміщення Politec CLV-2534, цифровий осцилограф YOKOGAWA DL7440, джерело живлення Д40-40-01Ц.

Експериментальні характеристики ЕМП ПТК із застосуванням бездатчикового способу управління при дослідженні у складі ДВЗ в діапазоні частот обертання 700-3000 об/хв. показали, що швидкість посадки якоря не перевищує заданої 0,42 м/с (рис. 9), час перемикання складає 3,76 мс і варіюється в діапазоні від 3,22 до 4,2 мс.



1 - струм якоря ЕМП ПТК I , А; 2 - швидкість якоря ЕМП ПТК V , м/с

Рисунок 9 - Осцилограми струму і швидкості якоря електромагнітного привіду повітряно-тактового клапану

Джерело: розроблено авторами

Зважаючи на неможливість практичної реалізації нульового значення струмового коридору, а так само впливом модуля формування форсованої напруги на постійну часу ланцюга розсіяння енергії, що запасена в обмотці ЕММ була виявлена нестабільність часу рушання якоря $\Delta t_{руш} = 0 \div 500$ мкс при незмінних значеннях температури ЕМП, струму утримання і перепаду тиску на клапані, що пояснюється неточністю виготовлення контактних поверхонь полюс-якір і принципом формування струму утримання.

Встановлено, що формування негативного імпульсу напруги на відпускаючій обмотці ЕММ дозволяє стабілізувати зміну часу рушання $\Delta t_{руш} = 0 \div 50$ мкс.

У процесі дослідження ЕМП ПТК ДВЗ було виконано завдання перевірки достовірності математичних моделей, які застосовуються для аналізу динамічних характеристик приводів. Для цього використовувався метод управління, заснований на аналізі струмів і напруги обмоток. Точність результатів оцінювалася шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних із визначенням абсолютних та відносних похибок. Результати перевірки достовірності створеної математичної моделі свідчать про можливість її застосування для визначення початкових параметрів керуючих сигналів у методі управління мехатронним електромагнітним приводом резонансного типу без використання датчиків для вимірювання положення та швидкості.

Висновки.

1. Запропоновано метод управління електромагнітним приводом клапану резонансного типу автомобільного двигуна внутрішнього згорання без використання спеціальних датчиків положення і швидкості, що здатен забезпечити меншу кінцеву швидкість його посадки в умовах зовнішніх збурюючих впливів при заданому часі спрацьовування.

2. Розроблено підхід до визначення початкових параметрів характеристики струму управління електромагнітним приводом повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання для здійснення первинного налаштування регулятора системи управління та створено алгоритм їх визначення.

3. Розроблено математичні моделі і алгоритми для обчислення статичних і динамічних параметрів мехатронного приводу повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання з інтегрованими моделями керованого силового перетворювача і системи управління, що дозволяють скоротити час на налаштування пристрою управління в реальних умовах тп підтверджена їх адекватність.

4. На основі отриманих результатів досліджень удосконалено мехатронний привід повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання з системою управління, стендові випробування яких засвідчили збільшення тиску в циліндрі, після закінчення фази впорскування, більш ніж на 20,3 %.

5. Забезпечено зниження споживання потужності за період перемикання мехатронного приводу повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання на 24,1 % за рахунок оптимізації його силової схеми управління, що дозволила стабілізувати час руху якоря в межах $0,1 \pm 10\%$ мс.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Агапоненко М.І. Розробка критерію вдосконалення системи технічної експлуатації засобів транспорту з врахуванням необхідної діагностичної інформації. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". 2018. №62. С.17-20.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В. Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочиснення автомобіля. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. Вип. 7(38). Ч.1 С. 167-176.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Розробка математичної моделі мехатронного модуля системи рульового управління вантажних автомобілів. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: V Міжнар. наук.-практ. конф., 19-21 квіт. 2023 р., м. Кропивницький : матеріали конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С. 9-11.
4. Голуб Д.В., Аулін В.В. Математична модель підвищення якості управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Вип. 9(40). Ч.2, 2024. С. 186-197.
5. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Харків: Майдан, 2018. 262 с.
6. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Козлова О. С. та ін. Сучасні електромехатронні комплекси і системи: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 116 с.
7. Gogola R., Kósa A. Electronic control of fuel mixture preparation and injection in internal combustion engines. American journal of mechanical engineering, 2014, Vol. 2, No. 7. P. 231-238.
8. William Bolton. Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering. Harlow:

- Pearson, 2015. 663 p.
9. Tutaj J., Fijałkowski B. A new fuel-injection mechatronic control method for direct-injection internal combustion engines. *Acta mechanica et automatica*, Vol. 12, No. 4, 2018. P. 276-280.
 10. Kortam M. Development of a mechatronic control system for a mechanical fuel injection system of a four cylinder automotive diesel engine. *Advances in Automobile Engineering*, Vol. 7, 2018. P. 2-9.

References

1. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Ahaponenko, M. I. (2018). Development of criteria for improving the technical maintenance system of vehicles considering necessary diagnostic information. *Mizhvuzivskyi zbirnyk "Naukovi notatky"*, (62), 17–20 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2023). Substantiation of the operational mechanism of the automotive windshield mechatronic system. *Tsentrálnoukrajinskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 7(38), Part 1, 167–176 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Zamurenko, A. S. (2023). Development of a mathematical model of a mechatronic steering module for trucks. In *Improving reliability and efficiency of machines, processes, and systems: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*, April 19–21, 2023 (pp. 9–11). Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
4. Holub, D. V., & Aulin, V. V. (2024). Mathematical model for improving control quality of the automotive cabin microclimate mechatronic system. *Tsentrálnoukrajinskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 9(40), Part 2, 186–197 [in Ukrainian].
5. Myhal, V. D. (2018). *Intelligent systems in automotive maintenance [Monograph]*. Kharkiv: Maidan [in Ukrainian].
6. Pavlenko, T. P., Shavkun, V. M., Kozlova, O. S., et al. (2019). *Modern electromechatronic complexes and systems [Textbook]*. Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv [in Ukrainian].
7. Gogola, R., & Kósa, A. (2014). Electronic control of fuel mixture preparation and injection in internal combustion engines. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 231–238.
8. Bolton, W. (2015). *Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Harlow: Pearson.
9. Tutaj, J., & Fijałkowski, B. (2018). A new fuel-injection mechatronic control method for direct-injection internal combustion engines. *Acta Mechanica et Automatica*, 12(4), 276–280.
10. Kortam, M. (2018). Development of a mechatronic control system for a mechanical fuel injection system of a four-cylinder automotive diesel engine. *Advances in Automobile Engineering*, 7, 2–9.

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Viktor Aulin**, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of Control of the Mechatronic System of Injection of the Internal Combustion Engine of the Car

Modern methods and technical solutions used in mechatronic fuel-air injection systems are analyzed to reduce emissions, improve dynamic characteristics and efficiency of the internal combustion engine of a car. The strengths and weaknesses of resonant, mechanical and gas turbine approaches to supercharging are considered.

Attention is paid to the pulsed method of supercharging using air-cycle valves, which has not yet been used in internal combustion engines and it is assumed that an injection system equipped with a pulse supercharging device with air-cycle valves is capable of reducing fuel consumption, reducing the content of harmful substances in exhaust gases, and increasing torque in the low and medium speed ranges for existing designs of gasoline and diesel internal combustion engines.

An integrated mathematical model has been developed that combines electrical and mechanical components, provides the possibility of numerical analysis of the dynamic properties of the electromagnetic drive, as well as modeling of the controlled object when creating methods and algorithms for the operation of the control system.

A method of controlling a high-speed electromagnetic mechanism of the resonant type has been developed, which allows ensuring the minimum anchor landing speed at a given switching time, even under conditions of external disturbing influences. A variant of creating an adaptive control system for such a mechanism without using specialized sensors to determine the position and speed of the executive body has been proposed. A feature of the approach is that the final anchor landing speed is regulated based on the analysis of the current and voltage characteristics of the electromagnetic mechanism control windings. A method for determining the initial parameters for tuning the electromagnet control algorithm is presented.

mechatronic drive, control, internal combustion engine, injection system, electromagnetic mechanism, air-stroke valve, structural diagram

Одержано (Received) 17.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 19.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

А. М. Зайцев¹, В. В. Аулін¹, проф., д-р техн. наук,
С. В. Лисенко¹, доц., канд. техн. наук, В. З. Гудь², проф., д-р техн. наук

¹Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

e-mail: AulinVV@gmail.com

Організація, принципи та система транспортного забезпечення сільськогосподарських підприємств

Стаття присвячена системі організації транспортного забезпечення сільськогосподарських підприємств в Україні. Зазначено специфічну роль автомобільного транспорту в агропромисловому виробництві. Сформульовані основні методологічні принципи оцінки якості надання транспортних послуг сільськогосподарським підприємствам. Запропоновано структуру системи організації транспортного обслуговування сільськогосподарських підприємств. Розглянуто сукупність підсистем системи транспортного обслуговування. Визначено сутність, функціональну роль, проведена їх класифікація та сформульовані основні завдання, які слід розв'язати для ефективного транспортного забезпечення.

система транспортного забезпечення, транспортний засіб, сільськогосподарське підприємство, транспортна послуга

Постановка проблеми. Сільськогосподарське виробництво у багатьох країнах світу визнане центральною ланкою агропромислового комплексу, оскільки воно забезпечує населення харчовими продуктами. Транспорт в агропромисловому виробництві (АПВ) є не тільки галуззю послуг по переміщенню продукції, а й безпосередньо відіграє роль в процесі виробництва сільськогосподарської продукції [1, 2]. Транспортні процеси в АПВ складають біля 30% усіх сільськогосподарських робіт і безпосередньо впливають на кількість, якість і собівартість виробленої продукції.

Розглядаючи транспорт як особливу галузь виробництва, можна зазначити, що ця галузь має власну специфіку процесу виробництва, техніку та технології, а також має власну організацію та систему управління [3, 4].

Проблема організації, визначення системи і основних принципів побудови транспортного забезпечення АПВ є цілком затребуваною сільськогосподарською наукою та аграрною практикою і відповідає цілям реформування продовольчого комплексу України [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сфера організації і ефективності транспортного забезпечення сільськогосподарських підприємств широко досліджена українськими і зарубіжними вченими.

В роботах [6, 7] досліджується питання значення і ролі транспорту в АПВ. Досліджується, як глобальний досвід, так і окремо досвід республіки Польща. Розглядаються перспективи застосування «розумних» технологій в системі транспорту СГП.

Аналіз впливу транспортної інфраструктури на сільське господарство і розвиток сільських регіонів розглядається в роботах [8, 9].

Базова модель оптимальної організації транспорту в сільському господарстві досліджується і обґрунтовується в роботі [10].

В дисертаційній роботі [11] досліджується управління транспортним забезпеченням сільськогосподарських підприємств. А також розробляються теоретичні і науково-методичні рекомендації щодо удосконалення управління транспортним забезпеченням сільськогосподарських підприємств.

В той час в роботі [12] досліджується сучасний стан транспортної логістики аграрних підприємств та розробляються пропозиції по впровадженню заходів організації транспортної логістики в сільському господарстві на умовах зменшення негативного впливу на довкілля.

Аналіз розглянутих робіт свідчить, що не достатньо досліджено організаційні принципи побудови системи транспортного забезпечення агропромислового виробництва та потребує розроблення структури транспортного обслуговування сільськогосподарських підприємств.

Постановка завдання. Метою даної роботи є з'ясування основних організаційних принципів, побудови системи транспортного забезпечення та організації транспортного обслуговування агропромислового комплексу в цілому і сільськогосподарських підприємств зокрема для їх ефективного функціонування.

Для реалізації поставленої мети в роботі розв'язують наступні завдання:

1. Визначити структурну систему транспортного забезпечення агропромислового комплексу і сільськогосподарських підприємств;
2. Сформулювати основні принципи організації і надання якісних транспортних послуг;
3. З'ясувати сутність і функціональні можливості сукупності підсистем системи організації транспортного обслуговування в агропромисловому виробництві та реалізація ними основних завдань.

Виклад основного матеріалу. Розглядаючи транспорт, як галузь матеріального виробництва, слід зазначити, що в агропромисловому виробництві (АПВ) він має певні специфічні особливості. Специфіка транспорту полягає в тому, що він не виготовляє продукції самостійно. Транспорт лише бере участь у створенні нової продукції, виконуючи допоміжні функції із забезпечення виробництва обладнанням, матеріалами та сировиною і, доставляючи готову продукцію до споживача. У результаті цього, відбувається збільшення вартості сільськогосподарської продукції на величину транспортних витрат, які, природно, входять у її собівартість.

Розроблено блок-схему системи транспортного обслуговування сільськогосподарських підприємств (СГП) (рис.1).

Ядром системи транспортного обслуговування сільськогосподарських підприємств є парк транспортних засобів (ТЗ), що забезпечують перевезення вантажів і людей, переміщення обладнання та матеріалів до місць його використання.

Можна бачити, що в першу чергу система транспортного забезпечення сільськогосподарських підприємств складається із забезпечуючих підсистем (правове забезпечення, нормативне забезпечення, інформаційне забезпечення), парку ТЗ та їх організації формування і використання. На схемі зазначені різні типи ТЗ та спеціальний рухомий склад. Організація формування і використання рухомого парку ТЗ полягає в наступному: обґрунтування обсягу перевезень; планування вантажопотоків; оптимізація маршрутів руху транспорту; вибір форм використання транспортних засобів; оптимізація парку ТЗ; організація праці і заробітної плати; організація ресурсного забезпечення; організація технічного обслуговування та ремонту (ТОiP); планування і облік затрат на експлуатацію транспорту.

Зазначимо, що автомобілі, автомобільні та тракторні причепа та напівпричепа, обладнані бортовою платформою, що не перекидається, відносяться до рухомого складу загального призначення і використовуються для перевезення вантажів усіх видів (крім рідких) без тари.

Спеціалізований рухомий склад включає ТЗ, кузови яких пристосовані для перевезення певних видів вантажів (рідкі вантажі, худобу, продукти, що швидко псуються і т.д.), а також обладнані автономними пристроями для виконання вантажно-розвантажувальних, монтажних, ремонтних та інших операцій (внесення добрив; роздача кормів та ін.).

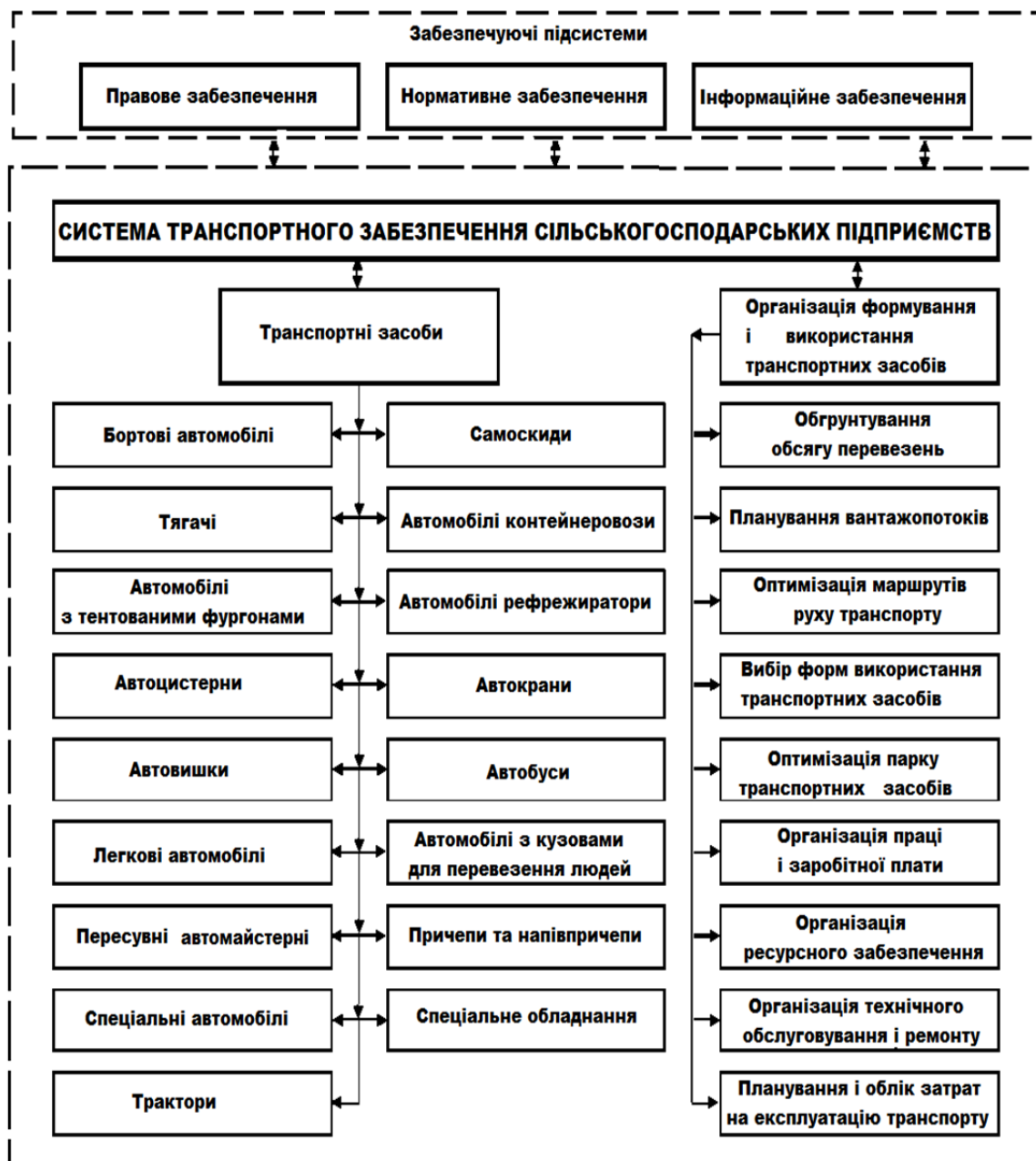


Рисунок 1 – Блок-схема системи транспортного забезпечення сільськогосподарських підприємств

Джерело: розроблено авторами

Усі транспортні роботи у сільському господарстві виконуються у межах транспортних і транспортно-виробничих процесів. Транспортні процеси являють собою операції завантаження, перевезення та розвантаження, а транспортно-виробничі процеси включають, крім вище перелічених операцій, ще й участь ТЗ у виробничих

операціях з сільськогосподарськими машинами, таких як посівні та збиральні роботи, внесення в ґрунт добрив, роздача кормів та ін..

Аналіз специфіки реалізації транспортних процесів в АВП та СПП показав, що в основі системи транспортного забезпечення покладено сукупність принципів організації транспорту і транспортних процесів. Основними методологічними принципами оцінки якості транспортних послуг в АПК та СГП є наступні:

- принцип системності та комплексності, що передбачає оцінку взаємодії комплексу внутрішніх та зовнішніх факторів;

- принцип інтегральності, що забезпечує поглиблення та конкретизацію зв'язків між факторами транспортних послуг;

- принцип обліку специфіки АПК, згідно з яким система оцінки ефективності транспортних послуг повинна включати показники, що відображають специфічні галузеві особливості та враховують їх вплив на конкурентоспроможність;

- принцип урахування особливостей різних сегментів ринку транспортних послуг в агропромисловому комплексі (АПК), заснований на максимально точному визначенні запитів споживачів та найбільш повному їх задоволенні;

- принцип квазістабільності ринкової кон'юнктури, враховує той факт, що у кожен конкретний час структура платоспроможного попиту цілком визначена і дозволяє здійснювати сегментацію споживачів за значимістю окремих показників якості транспортних послуг в АПК;

- принцип ієрархічності показників, ранжованих від загального до часткового, коли узагальнюючі показники відображають інтегральну характеристику підвищення конкурентоспроможності, а часткові - вплив на процес специфічних особливостей сільськогосподарської галузі;

- принцип інформаційної забезпеченості, що визначає використання показників, отриманих на основі інформації і мають повноту, достовірність і своєчасність надходження;

- принцип безперервності, що передбачає можливе коригування системи показників або включення до неї додаткових показників у міру надходження нових даних про транспортні послуги в АПК.

Розроблено схему системи організації транспортного обслуговування в АПК і СГП (рис. 2).

Можна бачити, що система організації транспортного обслуговування СГП складається із сукупності підсистем. Основними підсистемами системи організації транспортного обслуговування СГП є: підсистеми організації; структурні підсистеми; функціональні підсистеми; комунікативні підсистеми; інтеграційні підсистеми.

Підсистемами організації транспортного обслуговування є наступні: підсистема навантажувально-розвантажувальних робіт, транспортування вантажів, організації праці учасників транспортного обслуговування, організації інформаційних потоків.

Структурні підсистеми поділяються на дві підсистеми: підсистеми організації основних і допоміжних процесів транспортного обслуговування.

Функціональні підсистеми містять підсистеми організації і доставки сировини, матеріалів і комплектуючих на підприємство, організації переміщення вантажів всередині підприємства, організації доставки готової продукції споживачам.

Що стосується комунікативних підсистем, то вони виконують функції організації вертикальних, горизонтальних і мережевих взаємозв'язків.

Інтеграційні підсистеми: це підсистеми формування організаційної структури транспортного господарства; організації оперативного планування транспортного обслуговування; організації економічних відносин в системі транспортного обслуговування.

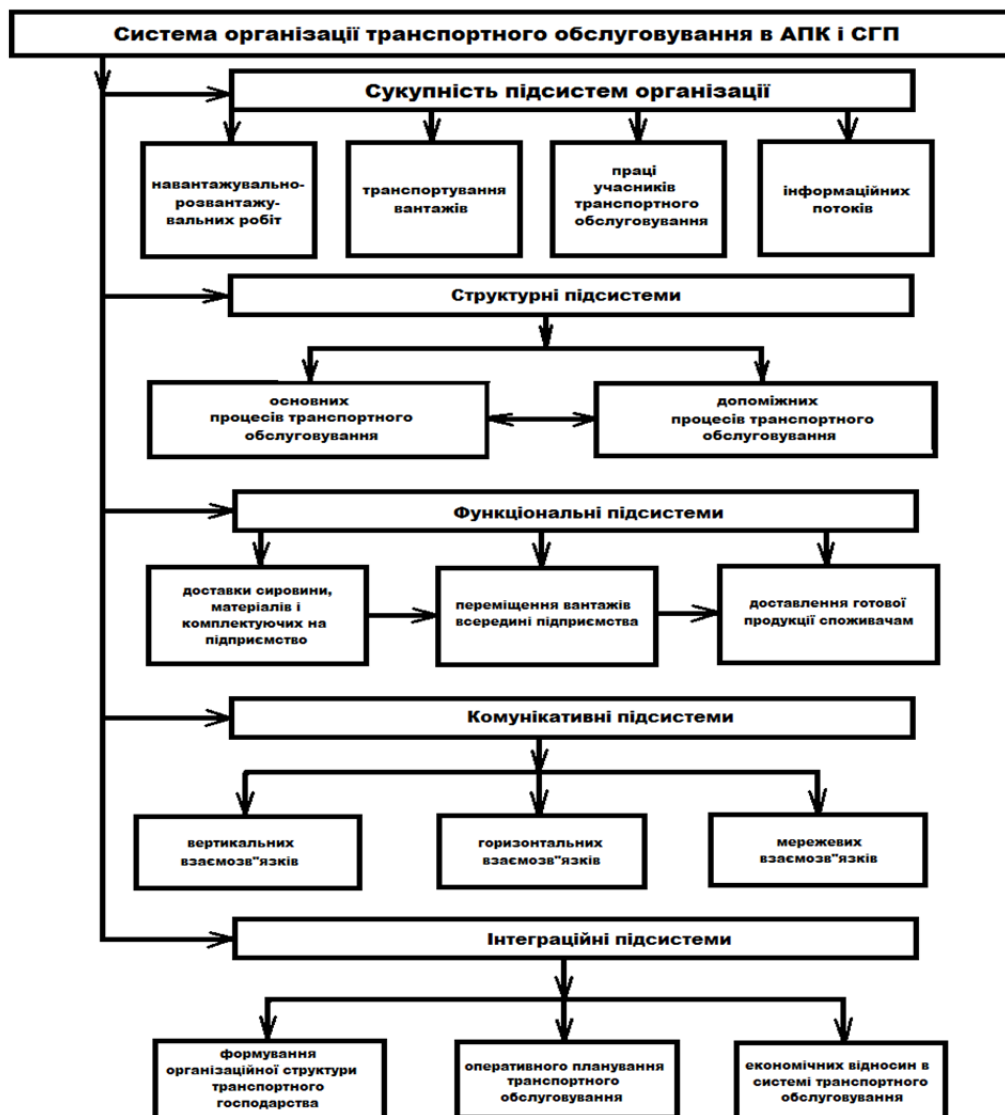


Рисунок 2 – Блок-схема структури системи організації транспортного обслуговування сільськогосподарських підприємств

Джерело: розроблено авторами

При цьому система організації транспортного обслуговування в АПК в цілому і СГП зокрема, реалізує наступну сукупність основних завдань: постачання продукції споживачам, матеріально-технічне забезпечення; підвищення якості перевезення вантажів; раціональне використання виробничих ресурсів; науково-технічний і організаційний розвиток системи транспортного обслуговування; вдосконалення економічних відносин; врахування і розвиток соціального фактору.

В даній роботі визначено, що для оцінки ефективного функціонування системи організації транспортного обслуговування АПК і СГП в напрямі вантажних перевезень, можливе використання наступних критеріїв: економічність вантажних перевезень; комплектність доставки вантажів; збереження вантажів; ритмічність вантажних перевезень; своєчасність доставки вантажів. Слід також зазначити, що основною метою організації системи транспортного обслуговування АПК і СГП є створення умов для економічної і соціальної ефективності її функціонування.

Висновки.

1. З'ясовані елементи системи транспортного обслуговування агропромислового комплексу в цілому і сільськогосподарського підприємства зокрема. Визначено забезпечуючі підсистеми, типи транспортних засобів, їх організація і напрям використання. Побудована блок-схема системи транспортного забезпечення сільськогосподарських підприємств.

2. Аналіз специфіки використання транспортних засобів в сільськогосподарському виробництві дав можливість сформулювати вісім основних методологічних принципів оцінки транспортних послуг і з'ясувати їх сутність і виконання ними основних функцій

3. З'ясовано сутність і функціональні можливості сукупності підсистем системи організації транспортного обслуговування АПК і СГП. Визначено наступні підсистеми: організаційні, структурні, функціональні, комунікативні і інтеграційні. Побудовано блок-схему системи організації транспортного обслуговування сільськогосподарських підприємств.

4. Визначено сукупність основних завдань системи організації транспортного обслуговування агропромислового комплексу взагалі і сільськогосподарського підприємства зокрема.

Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В., Лівіцький О.М. Підвищення ефективності використання транспортних машин у агропромисловому виробництві узгодженням їх експлуатаційних характеристик та умов функціонування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37) ч.ІІ. С.45-57.
2. Аулін В.В., Замота О.М. Економічне обґрунтування ефективності та рентабельності використання транспортних засобів на АТП. *Вісник інж. академії України*. 2014. №1. С. 160-164.
3. Аулін В.В., Лівіцький О.М., Замота О.М. Методологія вибору та управління ефективністю використання техніки у сільськогосподарському виробництві. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. Вип. 29. С.2-12.
4. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Чернай А.Є., Голуб Д.В., Головатий А.О. Теоретичне обґрунтування управління функціонуванням технічними та транспортними системами на основі методів системної теорії інформації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4(35). С.178-189.
5. 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.
6. The Role of Transport in Agriculture. KNOWHOW. URL: <https://knowhow.distrelec.com/transportation/the-role-of-transport-in-agriculture/> (дата звернення 06.10.2024).
7. Gorecka A., Rocicki T. The significance of transportation in agribusiness companies. *Carpathian Logistics Congress 2013* : зб. матеріалів конф., 9-11 груд. 2013 р. Краків, 2013. С. 24-30.
8. Tong T., Yu E., Cho SH., Jensen K., De La Torre Ugarte D. Evaluating the spatial spillover effects of transportation infrastructure on agricultural output across the United States. *Journal of Transport Geography*. 2013. Вип.30. С. 47-55. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.03.001.
9. Prus P., Sikora M. The impact of transport infrastructure on the sustainable development of the region – case study. *Agriculture*. 2021. Вип. 11(4). С. 279. DOI: 10.3390/agriculture11040279.
10. Mileusnic Z., Miodragovic L., Miscovic D., Dimitrijevic A. Basic model for optimal transport organization in agriculture. *Poljoprivredna tehnika*. 2012. Вип. 3. С. 91-105.
11. Болдирева Л.М. Управління транспортним забезпеченням сільськогосподарських підприємств: автореф. дис.. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: 08.00.04. Харків, 2008. 22 с.
12. Нечипоренко К.В. Транспортна логістика аграрних підприємств в системі сталого розвитку АПК. *Ефективна економіка*. 2015. Вип.12. URL: www.economy.nayka.com.ua/pdf/12_2015/67.pdf.

References

1. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., Holub, D. V., & Livitskyi, O. M. (2022). Improving the efficiency of transport machines in agricultural production by coordinating their operational characteristics and operating conditions. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 6(37), Part II, 45-57. [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., & Zamota, O. M. (2014). Economic substantiation of the efficiency and profitability of using vehicles at ATP. *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, (1), 160-164 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Livitskyi, O. M., & Zamota, O. M. (2016). Methodology for selecting and managing the efficiency of equipment use in agricultural production. *Technique in agricultural production, industrial mechanical engineering, automation*, (29), 2-12 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., Livitskyi, O. M., Chernai, A. E., Holub, D. V., & Holovaty, A. O. (2021). Theoretical substantiation of technical and transport systems operation management based on methods of system theory of information. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 4(35), 178-189 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Holub, D. V., Zamurenko, A. S., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., & Diachenko, V. O. (2021). Theoretical system-oriented approach to determining the integral indicator of the effectiveness of operations in transport systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 4(35), 232-247 [in Ukrainian].
6. The Role of Transport in Agriculture. (2024). *KNOWHOW*. <https://knowhow.distrelec.com/transportation/the-role-of-transport-in-agriculture/>.
7. Gorecka, A., & Rocicki, T. (2013). The significance of transportation in agribusiness companies. In *Carpathian Logistics Congress 2013* (pp. 24-30). Krakow.
8. Tong, T., Yu, E., Cho, S.H., Jensen, K., De La Torre Ugarte, D. (2013). Evaluating the spatial spillover effects of transportation infrastructure on agricultural output across the United States. *Journal of Transport Geography*, 30, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.03.001>.
9. Prus, P., & Sikora, M. (2021). The impact of transport infrastructure on the sustainable development of the region – case study. *Agriculture*, 11(4), 279. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040279>.
10. Mileusnic, Z., Miodragovic, L., Miscovic, D., & Dimitrijevic, A. (2012). Basic model for optimal transport organization in agriculture. *Poliprivredna tehnika*, 3, 91-105 [in Serbian].
11. Boldyreva, L.M. (2008). *Management of transport support of agricultural enterprises* [Abstract of candidate dissertation]. Kharkiv [in Ukrainian].
12. Nechyporenko, K.V. (2015). Transport logistics of agricultural enterprises in the system of sustainable development of the agro-industrial complex. *Efficient economy*, 12 [in Ukrainian].

Andrii Zaitsev¹, **Viktor Aulin**¹, Prof., Dr. tech. sci., **Serhii Lysenko**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Gud**², Prof., Dr. tech. sci.

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuy, Ternopil, Ukraine

Organization, Principles, and System of Transport Support for Agricultural Enterprises

This article is dedicated to the system of organizing transport support for agricultural enterprises in Ukraine. The specific role of road transport in agricultural production is noted. The basic methodological principles for assessing the quality of transport services provided to agricultural enterprises are formulated. A structure of the system for organizing transport services for agricultural enterprises is proposed, which consists of supporting subsystems (legal, regulatory, and informational support), a fleet of vehicles and their organization of formation and use (justification of transportation volume, planning of cargo flows, optimization of transport routes, selection of forms of vehicle use, optimization of the vehicle fleet, organization of labor and wages, organization of resource support, organization of maintenance and repair, planning and accounting of transport operating costs). The set of subsystems of the transport service system is considered, such as subsystems of organization (loading and unloading operations, cargo transportation, labor of transport service participants, information flows); structural subsystems (main and auxiliary processes of transport service); functional subsystems (delivery of materials to the enterprise, movement of goods within the enterprise, delivery of finished products); communication subsystems (vertical, horizontal, and network relationships); integration subsystems (formation of the organizational structure of the transport economy, operational planning of transport service, economic relations in the transport service system). The essence, functional role, classification, and basic tasks that need to be solved for effective transport support are defined

transport support system, transport vehicle, agricultural enterprise, transport service

Одержано (Received) 14.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

А.В. Йовченко, канд. техн. наук

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна,

e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua

Розробка пристрою для контролю безпеки руху вантажного транспорту з причепами

Системи пасивної безпеки зменшують ризик виникнення небезпечних ситуацій на дорозі. Вони допомагають водієві ефективно гальмувати, прискорюватися з оптимальною інтенсивністю та здійснювати маневри з мінімальними зусиллями. Розроблений пристрій може використовуватись для зовнішнього контролю обертання коліс причепа з кабіни водія, для допомоги водієві краще відчувати габарити причепа, за рахунок чого рух заднім ходом стає легшим, при гальмуванні можна визначити які колеса заблоковано.

пасивна безпека, пневматичні гальма, системи регулювання та контролю тиску в шинах, системи самонакачування шин, аварійні ситуації, транспортний засіб.

Постановка проблеми. Забезпечення безпеки в дорозі залишається однією з основних проблем транспортного сектора України. Рівень безпеки дорожнього руху залежить від багатьох чинників, зокрема, недостатньої культури та дисципліни учасників руху, низького рівня підготовки водіїв, технічного стану транспортних засобів (ТЗ) та їх експлуатації, якості дорожнього покриття та розмітки, перевантаженості дорожньої інфраструктури та ін. Особливі занепокоєння викликають частота та тяжкість аварій, у яких задіяні великовантажні ТЗ [1–3].

Для підвищення безпеки руху вантажні автомобілі з причепами додатково оснащуються світловими сигналами, які виконують важливі функції та сприяють безпечному пересуванню [4].

Для підвищення безпеки руху вантажівки з причепом часто оснащуються додатковими світловими сигналами, що дозволяють вирішувати низку важливих завдань:

- чітке позначення габаритів причепа, що особливо важливо в умовах недостатньої видимості;
- допомога у визначенні траєкторії руху задньої осі причепа на вузьких дорогах, оскільки з кабіни водія не завжди видно колеса причепа;
- забезпечення контролю за станом коліс, адже через велику довжину причепа або обмеження огляду в дзеркалах заднього виду водій може не помітити пошкодження чи навіть втрати коліс під час руху.

Ці заходи допомагають мінімізувати ризики і сприяють підвищенню загальної безпеки дорожнього руху. Однак, не допомагають точно визначити, чи колеса заблоковані.

Існують випадки, коли під час руху вантажівки на причепі відкручуються колеса, і водій може не помітити їх відсутність. Також можливе блокування коліс після тривалого простою або стоянки, коли транспорт зафіксований ручним гальмом.

На багатьох сучасних паркінгах вантажівки розміщують під кутом 45 градусів відносно в'їзду-виїзду. Це змушує водія при виїзді заломлювати тягач відносно причепа під достатнім кутом для візуального контролю за колесами. Враховуючи ці фактори, для кращого відчуття габаритів і контролю за колесами необхідна проста, але ефективна система пасивної безпеки.

В деяких вантажівках при гальмуванні ручним гальмом причіп фіксується за допомогою пневматичної системи з двома контурами. Якщо один із контурів виходить з ладу, гальмування продовжує виконувати справний контур, проте в цьому випадку задіяні лише два задні колеса.

Пневматичні гальма вважаються відносно ненадійними, оскільки часто виходять з ладу. Тому в причепах передбачені резервні гальма, які автоматично блокують колеса у разі втрати тиску. Однак потужний двигун вантажівки здатний продовжувати рух навіть із заблокованими колесами причепа, що може спричинити пошкодження шин та інших компонентів ходової частини [5].

На деяких причепах встановлено автоматичну пневматичну систему підйому однієї з осей при низькому завантаженні, що дозволяє зменшити навантаження на ведучу вісь, знизити тиск на дорожнє покриття та підвищити вантажопідйомність транспорту. Вона являє собою повноцінну вісь, оснащену гальмівною системою та пневматичними ресорами. При збільшенні завантаження підйомна вісь автоматично опускається. У сучасних вантажівках ця система самостійно визначає оптимальний момент для активації. Проте у випадках, коли система не спрацьовує або працює некоректно, це може призвести до надмірного навантаження на шини та їх передчасного зносу [6].

За несприятливих погодних умов, зокрема сильного морозу, гальмівні колодки можуть заклинити, що призводить до блокування коліс. Хоча потужності двигуна може вистачити, щоб зрушити вантажівку з місця, заблоковане колесо буде тертися об дорожнє покриття, що спричиняє швидке зношення шин. Уламки пошкодженої покритишки становлять небезпеку як для водія, так і для інших учасників дорожнього руху. Втрата шини може призвести до аварійної ситуації або значних затримок через необхідність заміни колеса в дорозі.

Крім того, можливе заклинювання підшипників або примерзання гальмівних колодок у причепі, що призводить до зупинки обертання колеса. У такому випадку воно просто "волочиться" по дорозі, що може залишитися непомітним для водія. Однак це спричиняє серйозні пошкодження — шина стирається, розшаровується або навіть може зірватися через перегрів від тертя об асфальт. У таких ситуаціях існує ризик втрати контролю над вантажівкою, що підвищує ймовірність дорожньо-транспортної пригоди [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні вантажні автомобілі оснащені численними електронними системами, які допомагають водієві в складних умовах гальмувати та прискорюватися з потрібною інтенсивністю, краще маневрувати без значних зусиль, підвищують рівень безпеки, оптимізують споживання пального, продуктивність, знижують рівень викидів, покращують процес керування та ін. До таких систем належать контроль шасі, тяги, електронне керування трансмісією, гальмівні системи, антиблокувальна та антизаносна система гальм (ABS), система стабілізації (ESC/P), круїз-контроль, система рульового керування (система утримання смуги руху, LKS), інформаційні системи, системи допомоги при обгоні на дорозі з однією смугою, системи допомоги на перехрестях з контролем швидкості під час маневрів наближення, система запобігання зіткненням з можливістю маневрів ухилення, системи освітлення, виявлення несправностей, тощо [3, 4, 8-10]. Слід зауважити, що дані системи суттєво збільшують вартість ТЗ.

Активним системам безпеки автомобіля приділяється багато уваги, проте, суттєвим є також врахування таких параметрів як рівень зчеплення шин з дорогою, швидкість автомобіля, дотримання дистанцій і наявність відповідних технологій автомобіля. Вони мають великий вплив на безпеку ТЗ. Зі збільшенням використання

автоматизованих транспортних систем зростатиме вплив рівня зчеплення шин на ймовірність зіткнення. Для споживачів та виробників автомобілів важливо, як ніколи, враховувати показники продуктивності шин. Відтак, шинна індустрія повинна й надалі фокусуватися на зчепленні з дорогою, особливо з мокрою як основній характеристиці безпеки та прагнути постійно вдосконалювати якість шин [11].

Контроль контакту шини з дорожньою поверхнею залишається складним викликом для ТЗ як дорожнього, так і позашляхового типу. Згідно зі статистикою, проблеми з шинами є однією з основних технічних причин дорожньо-транспортних пригод. Наприклад, надто низький тиск збільшує тертя кочення, що може викликати підвищений шум, перегрів гуми та скорочення строку служби шин. Це пов'язано з невизначеністю умов експлуатації та різноманітністю рельєфу місцевості. На взаємодію шини з поверхнею, яка визначає сили та моменти для забезпечення зчеплення й мобільності, впливають такі фактори, як статичні та динамічні характеристики шини, прикладене навантаження, швидкість руху та тиск у шині [12].

Одним зі способів підтримання оптимальних умов контакту є регулювання тиску в шинах. Для цього автоматизовані системи контролю тиску в шинах (ATPS) стають стандартним обладнанням більшості серійних наземних ТЗ. Вони забезпечують перевірку й автоматичне регулювання тиску до оптимального рівня. У критично важливих ситуаціях центральні системи регулювання тиску в шинах (CTIS) дозволяють адаптувати параметри тиску до специфіки місцевості, підвищуючи ефективність і безпеку експлуатації.

Попри численні переваги, системи ATPS мають і недоліки, серед яких: недостатній рівень енергії, що подається від акумуляторних батарей, можливі збої в роботі трансмісії, а також обмежений час безперервної експлуатації системи [13].

Однак, сучасний технічний прогрес не може врахувати всі проблеми, з якими стикаються водії. З часом будь-яка техніка може вийти з ладу, що здатне призвести до простоїв, затримки доставки вантажів, а в деяких випадках — до аварійних ситуацій. Під час руху водій постійно оцінює дорожню обстановку, а точність, надійність і швидкість керування ТЗ значною мірою залежать від його особистих навичок і професійних якостей.

Мета дослідження – розробка сигнального пристрою для контролю обертання коліс причепа з кабіни водія та для кращого сприйняття його габаритів за критерієм простоти та економічності.

Виклад основного матеріалу. З метою усунення зазначених недоліків систем безпеки та сигнальних пристроїв було розроблено пристрій пасивної безпеки, що дозволило вперше здійснювати візуальний контроль безпеки руху вантажного ТЗ з кабіни водія. При цьому пристрій відповідає вимогам економічності, простоти та не поєднаний з електричною системою ТЗ, збільшує безпеку дорожнього руху, дозволяючи виявити та усунути потенційні проблеми ще до їх виникнення.

На причепах встановлюються барабанні чи дискові гальмівні колодки, від чого залежить конфігурація дисків. Колісний диск – один з найбільш відповідальних елементів ходової частини вантажного автомобіля, який разом з шиною складає колесо. За допомогою диска, шина з'єднується зі ступицею ТЗ. Диск складається з двох частин: обод, фланець. Обод – частина диска, на яку встановлюється шина (форма та розмір якої дозволяє надійно на ньому закріпити). Фланець – частина диска в центральній частині обода, за допомогою якої колесо кріпиться на ступиці вісі вантажного автомобіля.

При однакових розмірах та формах обода, а також однакових розмірах шин, колісні диски можуть мати фланці різної конфігурації. Це пов'язано з особливостями

конструкції ступиць вісей ТЗ і вимогами правил дорожнього руху щодо дотримання габаритних розмірів ТЗ. Тому колісний диск крім габаритних розмірів обода має ознаку особливостей конструкції фланця.

Фланець кріпиться на ступиці осі елементами кріплення (шпильки, гайки, шайби), які мають свою форму та розміри. Відстань від місця кріплення диска до маточини, до центральної лінії колеса називається вильотом: що більший виліт, то глибше шина фіксуватиметься під колісною аркою.

Виліт може бути: негативним (коли він виступає за бічні габарити авто); нульовим (коли точка контакту з маточиною розташована посередині диска); позитивним (коли диск не виступає за бічні габарити машини). В залежності від типу диска використовуються різні довжини стержня пристрою. При проектуванні пристрою необхідно враховувати, щоб він не виходив за габарити вантажного ТЗ, що становить близько 20 см при використанні дисків з негативним вильотом, близько 13 см при використанні дисків з нульовим вильотом диска та близько 10 см при використанні диска з позитивним вильотом (рис. 1).



Рисунок 1 – Визначення крайньої габаритної точки

Джерело: розроблено автором

Ці параметри важливо враховувати, щоб забезпечити відповідність конструкції вимогам безпеки та експлуатації.

При русі автомобіля даний пристрій обертається по осі диска колеса, що дозволяє визначити, чи колесо обертається, чи заклинило. Водій особисто вирішує на які колеса причепа встановлювати даний пристрій (рис. 2). В більшості випадків водіям краще встановлювати декілька таких пристроїв.

Діаметр шпильки причепа, на яку встановлюють диск, в більшості випадків становить $\varnothing 22,5$ мм. Для стійки 2 пристрою при проектуванні беремо $\varnothing 24$ мм, для

шайби 3 $\varnothing 22,5$, оскільки її діаметр повинен співпадати з діаметром шпильки напівпричепа (рис. 2).



Рисунок 2 – Пристрій для контролю обертання коліс причепа:

1 – диск, 2 – стійка, 3 – гайка, 4 – стержень

Джерело: розроблено автором

Головними складовими цього пристрою є стійка та стержень, тоді як інші елементи вже наявні. Стержень виготовляється з пластику, а стійка – зі сталі. Невелика вага стержня мінімізує його деформацію.

Висновки. Запропонований пристрій може використовуватись: як діагностичний пристрій (для зовнішнього контролю обертання коліс причепа з кабіни водія, що видно у дзеркала заднього виду, при гальмуванні можна визначити які колеса заблоковано та чи в задовільному вони стані); для допомоги водієві краще відчувати габарити причепа, за рахунок чого рух заднім ходом стає легшим. Він має просту конструкцію, є економічно вигідним, покращує експлуатаційні властивості ТЗ та рівень безпеки, зручний у використанні. Зазвичай використовується в зимовий період, не залежить від електричних систем ТЗ та може бути демонтований за відсутності потреби.

Список літератури

1. Аварійність на автошляхах України URL: www.sai.gov.ua/ua/people/5.htm (дата звернення: 12.02.2025).
2. Статистика аварійності в Україні URL: <http://www.sai.gov.ua/ua/ua/static/23.htm> (дата звернення: 12.02.2025).
3. Про дорожній рух та його безпеку: проект Закону України від 26.09.2016, реєстр.№5184. URL: w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=60111&pf3540=400876. (дата звернення: 12.02.2025).
4. Осипов В. О. Щодо вдосконалення методики оцінки ефективності заходів з підвищення безпеки руху/ Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. 2012. № 3. С. 41-48.
5. Гальмівна система вантажного автомобіля. URL: <https://www.renamax.city>. (дата звернення: 12.02.2025).
6. Підйомні осі у напівпричепі [веб-сайт](https://yak.bono.odessa.ua/articles/pidjomna-vis-napivprichepa-jak-investicija-v.php). URL: <https://yak.bono.odessa.ua/articles/pidjomna-vis-napivprichepa-jak-investicija-v.php> (дата звернення: 12.02.2025).
7. Йовченко А.В. Підвищення контролю безпеки переміщення вантажного транспорту з причепами. *Молодь: наука та інновації 2024*: матеріали XII МНТК студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 13–15 листоп. 2024 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2024. Том 1. С. 155-156.
8. V. Soualmi, C. Sentouh, J.C. Popieul and S. Debernard. A shared control driving assistance system: interest of using a driver model in both lane keeping and obstacle avoidance situations. *12th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*. Las Vegas, NV, USA. August 11-15, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3182/20130811-5-US-2037.00015>
9. Felipe Jiménez, José Eugenio Naranjo, José Javier Anaya, Fernando García, Aurelio Ponz, José María Armingol. Advanced Driver Assistance System for road environments to improve safety and efficiency. 6th Transport Research Arena. *Transportation Research Procedia 14*. April 18-21, 2016. 2245-2254.
10. Hong Chen, Xun Gong, Yun-Feng Hu, Qi-Fang Liu, Bing-Zhao Gao, Hong-Yan Guo. Automotive Control: the State of the Art and Perspective. *Acta Automatica Sinica*. Vol 39. №4. 2013. 322-346.
11. Daniel Christ. Simulating the relative influence of tire, vehicle and driver factors on forward collision accident rates. *Journal of Safety Research*. Vol. 73, June 2020, 253-262.
12. Raul G. Longoria, Robert Brushaber, Andrew Simms. An in-wheel sensor for monitoring tire-terrain interaction: Development and laboratory testing. *Journal of Terramechanics* 82. 2019. 43-52.
13. Germano Sandoni, Martin Ringdorfer. Electronic regulation of an automated car tyres pressure control system. *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 39(16). 2006. 514-519.
14. Debajeet Mohapatra, Shikha Parashar. Review on self-inflation tire system. *Materials Today: Proceedings*.

Vol. 81, Part 2. 2023. 346-349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.262>.

References

1. Accidents on Ukrainian roads. (n.d.). Retrieved February 12, 2025, from www.sai.gov.ua/ua/people/5.htm [in Ukrainian].
2. Accident statistics in Ukraine. (n.d.). Retrieved February 12, 2025, from <http://www.sai.gov.ua/ua/ua/static/23.htm> [in Ukrainian].
3. On road traffic and its safety: Draft Law of Ukraine No. 5184. (2016, September 26). Retrieved February 12, 2025, from w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=60111&pf3540=400876 [in Ukrainian].
4. Osypov, V. O. (2012). On improving the methodology for assessing the effectiveness of measures to improve traffic safety. *Bulletin of the Donetsk Academy of Road Transport*, (3), 41–48 [in Ukrainian].
5. Truck brake system. (n.d.). Retrieved February 12, 2025, from <https://www.renamax.city> [in Ukrainian].
6. Lifting axles in semi-trailers. (n.d.). Retrieved February 12, 2025, from <https://yak.bono.odessa.ua/articles/pidjomna-vis-napivprichepa-jak-investicija-v.php> [in Ukrainian].
7. Yovchenko, A. V. (2024). Improving the safety control of the movement of freight transport with trailers. In *National Technical University “Dnipro Polytechnic” (Ed.), Youth: Science and Innovation: Proceedings of the Conference, Dnipro, November 13–15, 2024 (Vol. 1, pp. 155–156). NTU “DP”* [in Ukrainian].
8. Soualmi, B., Sentouh, C., Popieul, J. C., & Debernard, S. (2013). A shared control driving assistance system: Interest of using a driver model in both lane keeping and obstacle avoidance situations. *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Las Vegas, NV, USA, 46(15)*, 480–485. <https://doi.org/10.3182/20130811-5-US-2037.00015>.
9. Jiménez, F., Naranjo, J. E., Anaya, J. J., García, F., Ponz, A., & Armingol, J. M. (2016). Advanced driver assistance system for road environments to improve safety and efficiency. *Transportation Research Procedia*, 14, 2245–2254. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.240>.
10. Chen, H., Gong, X., Hu, Y.-F., Liu, Q.-F., Gao, B.-Z., & Guo, H.-Y. (2013). Automotive control: The state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 39(4), 322–346. [https://doi.org/10.1016/S1874-1029\(13\)60033-6](https://doi.org/10.1016/S1874-1029(13)60033-6).
11. Christ, D. (2020). Simulating the relative influence of tire, vehicle and driver factors on forward collision accident rates. *Journal of Safety Research*, 73, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.03.009>
12. Longoria, R. G., Brushaber, R., & Simms, A. (2019). An in-wheel sensor for monitoring tire-terrain interaction: Development and laboratory testing. *Journal of Terramechanics*, 82, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.12.004>.
13. Sandoni, G., & Ringdorfer, M. (2006). Electronic regulation of an automated car tyres pressure control system. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(16), 514–519. <https://doi.org/10.3182/20060912-3-DE-2911.00090>
14. Mohapatra, D., & Parashar, S. (2023). Review on self-inflation tire system. *Materials Today: Proceedings*, 81(Part 2), 346–349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.262>.

Alla Yovchenko, PhD tech. sci.

Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Development and Modeling of a Device to Improve Safety Control of Freight Transport With Trailers

Ensuring vehicle safety is a major issue for the Ukrainian transport industry, the level of which is influenced by numerous factors, including: road network congestion; road network expansion; road quality and markings; increasing vehicle fleet and population growth; low discipline and culture of road users; insufficient driver qualifications; technical condition of vehicles and their improper operation, etc. Of particular concern are frequent and serious accidents involving large-sized freight transport. Active safety systems reduce the risk of dangerous situations on the road and contribute to more confident vehicle control. They help the driver effectively brake, accelerate with optimal intensity, and perform maneuvers with minimal effort.

Over time, any equipment can fail, which can lead to downtime, delays in cargo delivery, and in some cases, to emergencies. The trailer braking system is constantly being improved, which allows for better control during operation. While driving, the driver constantly assesses the road situation, and the accuracy, reliability and speed of vehicle control largely depend on his personal skills and professional qualities.

The developed device can be used: for external control of the rotation of the trailer wheels from the driver's cabin, which is visible in the rear-view mirror; to help the driver better feel the dimensions of the trailer (due to which reversing becomes easier); as a diagnostic device (when braking, it is possible to determine which wheels are locked, whether they are in satisfactory condition). Simple, cost-effective. In most cases, it is used in the winter, not connected to other electrical systems of the car.

active safety, air brakes, tire pressure regulation and control systems, tire self-inflation systems, emergency situations, vehicle.

Одержано (Received) 14.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

Andrii Molodan¹, Prof., DSc., **Oleksandr Polyanskyi**¹, Prof., DSc.,
Mykola Artomov², Prof., DSc., **Oleh Pushkarenko**²

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

²*State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine*

e-mail: tmirm@ukr.net, oleggranit10011987@ukr.net

The Impact of Mechanical Losses on Engine Power of a Wheeled Vehicle under Cylinder Deactivation

A methodology for calculating mechanical losses in internal combustion engines has been proposed, enabling the assessment of the influence of the number of deactivated cylinders on the effective power output of a wheeled vehicle engine with an accuracy of approximately 10%. This method allows for the estimation of mechanical power losses and the mechanical efficiency (mechanical efficiency coefficient) under varying engine operating conditions.

It has been determined that when half of the engine cylinders are deactivated, the nominal power output decreases to approximately 35–40% of its full-capacity level. The discrepancy between the experimental and calculated values of the mechanical loss power change coefficient does not exceed 8%. At the same time, the deviation between the calculated and experimental values of the engine load coefficient based on power remains within 5%. Additionally, it has been established that mechanical efficiency increases by up to 7% when the engine is operated at a 48% load level, which indicates improved energy utilization under partial load conditions.

Furthermore, it was observed that as the number of deactivated cylinders increases, the magnitude of mechanical power losses correspondingly increases, while the mechanical efficiency of the engine decreases. This is primarily attributed to the redistribution of internal mechanical resistances within the engine and the non-linear behavior of frictional forces and parasitic losses under partial load regimes.

A clear correlation between the mechanical efficiency and the effective engine power has been identified. Specifically, an increase in the number of deactivated cylinders (as a factor variable) leads to a rise in mechanical losses (as a response variable) and a reduction in mechanical efficiency. These findings provide a theoretical and practical foundation for optimizing engine control strategies in variable load conditions and contribute to enhancing overall fuel efficiency and operational performance of wheeled vehicles.

variation, engine power, mechanical losses, wheeled vehicle, engine, cylinder deactivation

Formulation of the problem. The power of mechanical losses under all mechanical efficiency conditions changes in a similar manner [1], as it primarily depends on the crankshaft rotational speed and remains nearly constant. Therefore, mechanical efficiency is largely correlated with the mechanical loss power (mainly due to the reduction of pumping losses).

Automotive and tractor engines achieve maximum mechanical efficiency at approximately 75% of rated load, and this efficiency remains practically unchanged when the load is reduced to 50% of the rated value. When the load falls below 40% of the rated level, engine operating conditions deviate significantly from the optimal range, and mechanical efficiency declines rapidly. In high-performance engines, the threshold below which mechanical efficiency drops sharply is around 30% of the rated load.

Additionally, automotive and tractor engines often operate in idle mode, which, according to [2], accounts for more than 22% of total operating time.

Analysis of recent research and publications. A literature review has shown that there is a lack of data regarding the determination of mechanical losses during cylinder deactivation [3]. In many cases, the rated power of automotive and tractor engines exceeds the actual operational demand – these engines are rarely operated under full load conditions [3]. According to research conducted at enterprises in EU countries [3], engines typically operate at approximately 60% of their rated load. According to [4], electric motors achieve maximum mechanical efficiency at loads ranging from 60% to 100% of the rated value. However, according to data from [5] (USA), the relationship between efficiency and engine load is

significantly different.

Setting objectives. The purpose of this study is to improve the performance characteristics of automotive and tractor engines by determining the mechanical loss power and substantiating the optimal number of deactivated cylinders.

Achieving the stated goal involves solving the following tasks:

- determine the impact of mechanical losses during the deactivation of some cylinders in automotive and tractor engines on their effective power output;
- determine the mechanical loss power and the mechanical efficiency under engine load conditions with partial cylinder deactivation;
- perform a correlation-regression analysis of the dependence of mechanical efficiency on the effective power output of the engine under various numbers of operating cylinders.

Presenting main material. If the fuel supply to a cylinder with a piston is interrupted, but the piston continues to move in idle mode, additional energy losses associated with the motion of the piston and the related mechanisms must be considered.

The mechanical loss power of a multi-cylinder automotive and tractor engine under different numbers of operating cylinders (without supercharging), denoted as N_{mv} , consists of the following components – power losses due to friction, N_{ter} ; power losses due to pump strokes, N_{nv} ; power required to drive auxiliary mechanisms, N_{dm} (fuel pump, oil pump, water pump, fan, gas distribution mechanism); and power losses resulting from changes in the thermal balance between the operating and non-operating cylinders, N_t .

$$N_{mv} = \frac{N_{in}}{\eta_m} (1 - \eta_m). \quad (1)$$

or

$$N_{mv} = N_{ter} + N_{nv} + N_{dm} + N_t, \quad (2)$$

where N_{in} – the indicated power of the engine,

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_{mv} + N_e} \text{ – mechanical efficiency of the engine;}$$

N_e – effective power of the engine without cylinder deactivation.

The mechanical loss power of the engine at different numbers of operating cylinders $N_{mv}^{i_{cyl}}$ can be represented in the following form [6]

$$N_{mv}^{i_{cyl}} = N_{mv} \cdot \left(\frac{i_{cyl}'' \cdot k_1}{i_{cyl}'} + \frac{\Delta i_{cyl} \cdot k_2}{i_{cyl}'} \right) \quad (3)$$

where i_{cyl}' – total number of cylinders;

i_{cyl}'' – number of operating cylinders;

Δi_{cyl} – number of deactivated cylinders;

k_1 – coefficient accounting for the variation in mechanical losses in operating cylinders (for calculation purposes, it is assumed that mechanical losses do not change with load);

k_2 – coefficient accounting for the variation in mechanical losses in deactivated cylinders

$$k_2 = f_{\Delta} \cdot \Delta_{mv} \quad (4)$$

where f_{Δ} – coefficient characterizing the variation in friction losses during cylinder

cranking (for calculation purposes, it is assumed that these losses remain unchanged);

Δ_{mv} – portion of the mechanical loss power in deactivated cylinders compared to the mechanical loss power of the engine cylinders without deactivation.

In case of fuel supply deactivation only

$$\Delta_{mv} = 1 - \Delta_{pn} - \Delta_t \quad (5)$$

where Δ_{pn} – portion of mechanical losses spent on driving the fuel pump;

Δ_t – portion of losses due to changes in the thermal balance.

In the case of fuel supply deactivation and elimination of pumping losses in the cylinder-piston group (CPG) due to the implementation of a bypass valve into the combustion chamber

$$\Delta_{mv} = 1 - (\Delta_{pn} + \Delta_t + \Delta_{nx}) \quad (6)$$

where Δ_{nx} – portion of losses due to pumping strokes.

If fuel supply is deactivated and pumping losses in the CPG are eliminated by introducing a bypass valve into the combustion chamber, and if the engine design also allows disabling the valve train drive, the portion of mechanical losses in deactivated cylinders will be as follows

$$\Delta_{mv} = 1 - (\Delta_{pn} + \Delta_t + \Delta_{nx} + \Delta_{gtm}) \quad (7)$$

where Δ_{gtm} – portion of losses spent on driving the valve timing mechanism (gas distribution mechanism).

As a result of substituting (4) into (3), we obtain the following expression for determining the mechanical losses of the engine when part of its cylinders is deactivated

$$N_{mv}^{i_{cyl}} = N_{mv}^{i_{cyl}} \cdot \left(\frac{i_{cyl}''}{i_{cyl}'} \cdot k_1 + \frac{\Delta i_{cyl}}{i_{cyl}'} \cdot f_{\Delta} \cdot \Delta_{mv} \cdot \Delta_t \right) \quad (8)$$

where $N_{mv}^{i_{cyl}}$ – mechanical loss power of the engine without cylinder deactivation.

Let us denote the expression in parentheses as k_{mt} – a coefficient that characterizes the variation in mechanical and thermal losses of the engine when part of the cylinders is deactivated

$$N_{mv}^{i_{cyl}} = N_{mv}^{i_{cyl}} \cdot k_{mt}, \quad (9)$$

Assuming that $k_1 = 1$ and $f_{\Delta} = 1$ [7]

$$k_{mt} = \frac{i_{cyl}''}{i_{cyl}'} + \frac{\Delta i_{cyl}}{i_{cyl}'} \cdot \Delta_{mv} \cdot \Delta_t. \quad (10)$$

To verify the proposed method for calculating engine mechanical losses under partial cylinder deactivation, experimental studies were carried out on a multi-cylinder diesel engine of medium power class [8]. The test bench experiments were conducted under industrial conditions at a mechanical repair facility in Kharkiv, using appropriate measuring instruments and control equipment. Engine loading was performed using an electric dynamometer equipped with a balancing machine.

According to the calculations, deactivation of fuel supply and elimination of pumping losses in the cylinder-piston group (CPG) for four cylinders resulted in a reduction of mechanical losses by 10.7% (Fig. 1).

One of the key indicators of engine mechanical losses is mechanical efficiency η_m . Its maximum value is achieved at the rated engine power, which changes under cylinder

deactivation. The new value of effective power $N_e^{i_{cyl}}$ under cylinder deactivation can be determined using the following expression

$$N_e^{i_{cyl}} = N_e \cdot k_{PN} \quad (11)$$

where k_{PN} – engine load coefficient by power, which characterizes the change in effective engine power during partial cylinder deactivation.

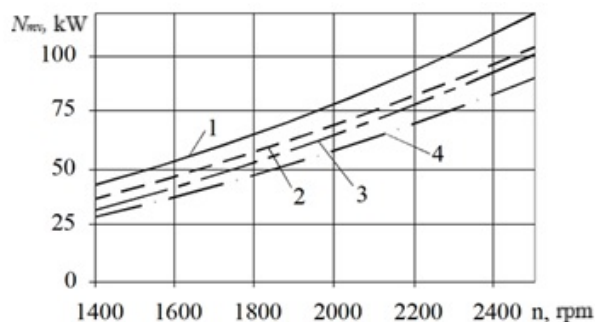


Figure 1 – Dependence of engine mechanical loss parameters on crankshaft rotational speed for the cases of all and half of the cylinders operating:

1 – N_{mv8} *exp.*; 2 – N_{mv4} *exp.*; 3 – N_{mv8} *calc.*; 4 – N_{mv4} *calc.*

Source: developed by the author

Let us define the coefficient k_{PN} , assuming that the theoretical indicated power of a single operating cylinder is

$$N_{in}^{li_{cyl}} = N_{in}^{i_{cyl}} / i_{cyl} \quad (12)$$

where $N_{in}^{li_{cyl}}$ – theoretical indicated power of one operating cylinder;

$N_{in}^{i_{cyl}}$ – indicated engine power.

The indicated power of the engine during cylinder deactivation at maximum fuel supply is equal to

$$N_{in}^{li_{cyl}} = N_{in}^{i_{cyl}} / i_{cyl} \cdot i_{cyl}'' \quad (13)$$

Using the expression

$$N_e^{i_{cyl}} = N_{in}^{i_{cyl}} - N_{mv}^{i_{cyl}} \quad (14)$$

and considering (8), (11), and (13), as well as several transformations, we can determine the coefficient k_{PN} that describes the change in engine power under cylinder deactivation

$$k_{PN} = \frac{i_{cyl}''}{i_{cyl}' \cdot \eta_m} \cdot (1 - k_1 + k_1 \cdot \eta_m) - \frac{\Delta i_{cyl}}{i_{cyl}'} \cdot f_{\Delta} \cdot \Delta_{mv} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (15)$$

Under the assumptions $k_1 = 1$ and $f_{\Delta} = 1$ [7], we obtain

$$k_{PN} = \frac{i_{cyl}''}{i_{cyl}'} - \frac{\Delta i_{cyl}}{i_{cyl}'} \cdot \Delta_{mv} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (16)$$

Thus, the power of a multi-cylinder automotive and tractor engine at different numbers of operating cylinders (without supercharging), taking into account (11), (14), and (16), is determined by the following expression

$$N_e^{i_{cyl}} = N_e \cdot \left(\frac{i_{cyl}''}{i_{cyl}'} - \frac{\Delta i_{cyl}}{i_{cyl}'} \cdot \Delta_{mv} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \right) \quad (17)$$

The mechanical loss indicators were determined for the engine as fractions of the total mechanical loss power, which are known from [8, 9]: $\Delta_{pn} = 0,015 - 0,02 \%$; $\Delta_{mx} = 0,13 - 0,15 \%$.

During experimental studies with increasing engine crankshaft speed from 1400 rpm to 2400 rpm, at rated power output $N_{nom} = 154,5$ kW, the mechanical loss power of the output engine increased from 42.65 kW to 118.1 kW, i.e., $\Delta N_{mv} = 75,45$ kW. After eliminating pumping losses in four cylinders, the increase in mechanical loss power under growing engine speed from 8th cylinder activation was reduced to a range of 36.65 kW to 104.25 kW, i.e., $\Delta N_{mv} = 67,6$ kW.

The reduction in mechanical loss power with a decreasing number of operating engine cylinders occurs because, in deactivated cylinders, the gas exchange process ceases and the pumping losses become nearly zero. In this case, work is spent only on compressing and expanding the air, which practically equals the work of the air itself. When engine speed increases from 1400 to 2400 rpm, the coefficient of mechanical loss power change k_{mt} increases slightly and differs from the calculated value by no more than 8%.

The calculated engine load coefficient k_{PN} increases proportionally to the number of operating cylinders and characterizes the increase in the engine's maximum effective power [6, 10]. The difference between calculated and experimental values of k_{PN} does not exceed 5% (Fig. 2).

The nature of mechanical efficiency variation as a function of engine load coefficient under all-cylinder and partial-cylinder operation is practically the same (Fig. 3). The maximum mechanical efficiency at full-cylinder operation is $\eta_{mt} = 0,83$, and for seven, six, five, four, three, and two operating cylinders it is respectively: 0.79; 0.68; 0.5; 0.34; 0.14; and 0.04 – the last of which is practically unfeasible due to extremely low power output.

It is evident from Fig. 3 that mechanical loss power exceeds the effective engine power when mechanical efficiency is less than 1%.

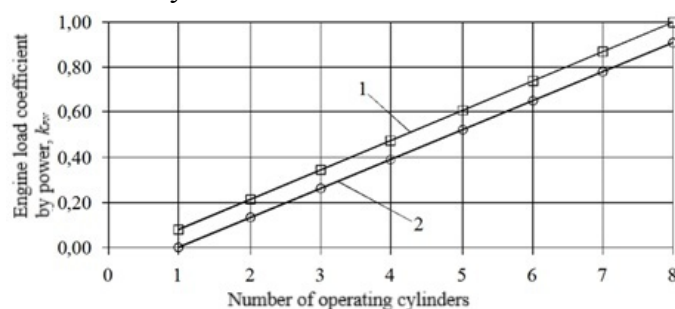


Figure 2 – Dependence of the calculated and experimental coefficients of nominal engine power variation on the number of operating cylinders ($n = 2400$ rpm): 1 – calculated; 2 – experimental
Source: developed by the author

Correlation analysis of the dependence of mechanical efficiency on the effective engine power at different numbers of operating cylinders solves two main tasks.

The first task is to determine the type of regression equation. This is of critical importance, as the correct choice directly affects the final result of studying the relationship between mechanical losses and the effective power of an automotive and tractor engine under various numbers of non-operating cylinders.

The second task is to select the polynomial form of the regression equation of mechanical losses with respect to the number of deactivated cylinders and the effective power of the engine, in order to determine the degree of influence of the number of non-operating

cylinders on engine power depending on the engine load. This task is solved mathematically by determining the parameters of the correlation equation.

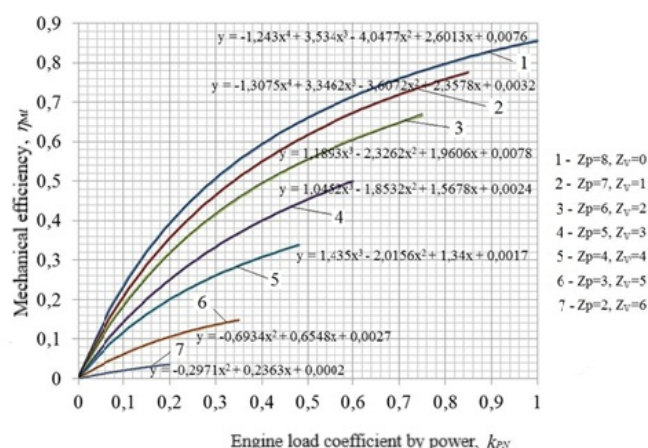


Figure 3 – Correlation between mechanical efficiency and engine power at different numbers of operating cylinders

Source: developed by the author

A decisive role in selecting the form of the relationship between these parameters belongs to theoretical analysis. As the number of deactivated cylinders (independent variable) increases, the mechanical loss power (dependent variable) increases and mechanical efficiency decreases. With the increase in the independent variable, the dependent variable generally increases proportionally. Therefore, the relationship between them can be described by a polynomial regression equation for each specific case of cylinder deactivation (Fig. 3).

Conclusions. To improve the accuracy of the obtained results:

1. A method for calculating mechanical losses is proposed, which allows determining the influence of the number of deactivated cylinders on the engine's effective power, mechanical loss power, and mechanical efficiency with an accuracy of approximately 10%.

2. It was established that, when half of the cylinders are deactivated, the rated power constitutes 35-40%; the discrepancy between experimental and calculated results of the mechanical loss power variation coefficient does not exceed 8%; the discrepancy between calculated and experimental values of the load coefficient based on power does not exceed 5%; mechanical efficiency increases by 7% at a load level of 48%.

3. A correlation relationship between mechanical efficiency and effective engine power has been established: as the number of deactivated cylinders (independent variable) increases, the mechanical loss power (dependent variable) increases, while mechanical efficiency decreases.

List of references

1. Куций П. В. Поліпшення експлуатаційних показників транспортних засобів в неусталених режимах оптимізацією способу регулювання дизелів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 : захист 06.11.2015 / наук. кер. А. Г. Говорун. Київ: НТУ, 2015. 206 с.
2. Volvo Group. Diesel engine load monitoring in agricultural tractors : technical report // Volvo Group R&D / Göteborg : Volvo Group, 2020. 35 p.
3. Makarewicz G., Tomaszewski F. Analysis of mechanical losses in tractor diesel engines under partial load. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 67, No. 3. P. 245–252.
4. Jankowski R. Optimizing tractor engine efficiency under variable load conditions. *Agricultural Engineering International. CIGR Journal*. 2022. Vol. 24, No. 4. P. 137–145.
5. European Commission. Best Available Techniques Reference Document for Energy Efficiency (BREF) [Електронний ресурс] : reference document // European Commission, Joint Research Centre / Brussels : JRC Science Hub, 2021. Режим доступу: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/energy-efficiency>
6. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2023: Energy Efficiency Indicators and Trends : report // International Energy Agency / Paris : IEA, 2023. URL: www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023.
7. Popescu A., Vasile A. Modern methods for estimation of mechanical losses in internal combustion engines. *Romanian Journal of Automotive Engineering*. 2019. Vol. 15, No. 1. P. 29–36.
8. Молодан А. О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в

- режимі відключення частини циліндрів : дис. на здобуття наук. ступеня д-р техн. наук : 05.22.20 : захист 12.05.2021 / наук. кер. О.С. Полянський. Харків: ХНАДУ, 2021. 387 с.
- Zalewski K. Condition monitoring of the piston-cylinder group in diesel engines using gas flow diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 151. Article 107356.
 - Kwiatkowski T., Nowak M. Study of diesel engine regulation through fuel injection bypass systems // *Energy Conversion and Management* / 2020. Vol. 213. Article 112785.

References

- Kutsiy, P. V. (2015). Polipshennya ekspluatatsiyних pokaznikiv transportnikh zasobiv v neustalenykh rezhimakh optimizatsiyeyu sposobu rehulyuvannya dizeliv [Dis. kand. tekhn. nauk, NTU]. http://diser.ntu.edu.ua/Kutsyi_dis.pdf [in Ukrainian].
- Volvo Group. (2020). Diesel engine load monitoring in agricultural tractors (Technical report). Volvo Group R&D.
- Makarewicz, G., & Tomaszewski, F. (2021). Analysis of mechanical losses in tractor diesel engines under partial load. *Journal of Mechanical Engineering*, 67(3), 245–252.
- Jankowski, R. (2022). Optimizing tractor engine efficiency under variable load conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(4), 137–145. cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7447.
- European Commission. (2021). Best Available Techniques Reference Document for Energy Efficiency (BREF). JRC Science Hub. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/energy-efficiency>.
- International Energy Agency. (2023). Energy efficiency 2023: Energy efficiency indicators and trends [Report]. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>.
- Popescu, A., & Vasile, A. (2019). Modern methods for estimation of mechanical losses in internal combustion engines. *Romanian Journal of Automotive Engineering*, 15(1), 29–36.
- Molodan, A. (2021). Naukovi osnovy zabezpechennia nadiinosti i funktsionalnoi stabiliti kolisnykh mashyn v rezhymi vidkliuchennia chastyny tsylindriv [Doctoral dissertation, KhNADU]. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis_Molodan.pdf [in Ukrainian].
- Zalewski, K. (2021). Condition monitoring of the piston-cylinder group in diesel engines using gas flow diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 151, Article 107356. doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107356.
- Kwiatkowski, T., & Nowak, M. (2020). Study of diesel engine regulation through fuel injection bypass systems. *Energy Conversion and Management*, 213, Article 112785. doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112785.

А. О. Молодан¹, проф., д-р техн. наук, **О. С. Полянський**¹, проф., д-р техн. наук,

М. П. Артёмов², проф., д-р техн. наук, **О. Ю. Пушкаренко**²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

²Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

Вплив механічних втрат на потужність двигуна колісного транспортного засобу за умов деактивації циліндрів

Запропоновано методику розрахунку механічних втрат у двигунах внутрішнього згорання, яка дає змогу оцінити вплив кількості деактивованих циліндрів на ефективну потужність двигуна колісного транспортного засобу з точністю близько 10%. Ця методика дозволяє визначити втрати механічної потужності та коефіцієнт механічної ефективності за різних режимів роботи двигуна.

Встановлено, що при деактивації половини циліндрів двигуна номінальна потужність знижується до приблизно 35–40% від її повного значення. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями коефіцієнта зміни потужності механічних втрат не перевищує 8%. Водночас відхилення між розрахунковими та експериментальними значеннями коефіцієнта навантаження двигуна за потужністю становить не більше 5%. Крім того, встановлено, що механічна ефективність збільшується до 7% при роботі двигуна на рівні навантаження 48%, що свідчить про підвищення ефективності використання енергії за умов часткового навантаження.

Також було зафіксовано, що зі збільшенням кількості деактивованих циліндрів зростає величина втрат механічної потужності, тоді як механічна ефективність двигуна знижується. Це зумовлено, передусім, перерозподілом внутрішніх механічних опорів у двигуні та нелінійним характером роботи сил тертя та паразитних втрат за умов часткового навантаження.

Виявлено чітку кореляцію між механічною ефективністю та ефективною потужністю двигуна. Зокрема, збільшення кількості деактивованих циліндрів (як факторної змінної) призводить до зростання механічних втрат (як результативної змінної) та зниження механічної ефективності. Отримані результати створюють теоретичну й практичну основу для оптимізації стратегій керування двигуном у змінних режимах навантаження та сприяють підвищенню загальної паливної ефективності й експлуатаційних характеристик колісних транспортних засобів.

зміна, потужність, механічні втрати, колісна машина, двигун, відключення циліндрів

Одержано (Received) 13.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

С. Ю. Тищенко, А. А. Сергійчук, 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

Методи визначення потреб підприємств автосервісу в запасних частинах та розробка методики їх впливу на загальну працездатність автомобілів

Стаття присвячена методам визначення потреб підприємства автосервісу в запчастинах та розробці методики їх підбору та впливу на загальну працездатність легкових автомобілів. Розглянуто групи номенклатури запасних частин. Визначено ряд статистичних показників, фактичної і нормативної потреби підприємства автосервісу в запасних частинах. Визначено коефіцієнт їх використання. Розроблено методику оцінки ступеню впливу елемента (деталі, вузла, системи, агрегату) автомобіля на його працездатність. Запропоновано п'ять етапів реалізації методики. На першому етапі визначається вплив ресурсовизначальних відмов на стан автомобіля. На другому етапі здійснюється оцінка впливу відмов деталей, вузлів, систем і агрегатів в балах на загальну працездатність автомобіля. На третьому етапі визначаються статистичні показники зібраного масиву бази даних експертних оцінок. На четвертому етапі визначається масив витрат на придбання запасних частин в системі дистрибуції, щоб підтримати працездатність автомобіля. На п'ятому етапі розв'язується завдання відбору з вихідної номенклатури елементів легкових автомобілів найбільш критичних і значущих з точки зору наслідків відмови та вартості їх придбання. Сформульовані відповідні умови для визначення елементів, що істотно обмежують працездатність легкових автомобілів. Методику апробовано на легкових автомобілях марки Renault.
легковий автомобіль, технічний стан, відмова, елемент, запасна частина, методика оцінки впливу, працездатність автомобіля

Постановка проблеми. Найважливішою умовою функціонування станцій технічного обслуговування (СТО) і системи дистрибуції постачання запасних частин легкових автомобілів є узгодження їх роботи спрямованої на підвищення ефективності. Вимагається також розробка відповідних методів аналізу ресурсовизначальних деталей, вузлів, систем і агрегатів автомобілів з оцінюванням і прогнозуванням поведінки систем СТО та дистрибуції запасних частин. Необхідні і методи оцінок та прогнозування їхньої поведінки в динамічних умовах функціонування.

Для ринку автосервісного обслуговування [1] та дистрибуційних систем постачання запасних частин в умовах України наявні наступні проблеми:

- спостерігається ізольованість функціонування СТО та їх фінансової документації, що обмежує і ускладнює методи збирання та аналізу інформації для дослідження принципів і характерних функцій, що дозволяє розробити та запропонувати інноваційні підходи ефективної роботи в мережі СТО і систем дистрибуції запасних частин;
- відсутні методики [2], що надають можливість проводити оцінку ефективності функціонування в мережі СТО та системи дистрибуції постачання запасних частин на основі кількісних і якісних показників, та обсягу потреб у запасних частинах (ЗЧ).

Вищевикладені проблеми потребують формування інноваційних принципів та методик, а також новітніх підходів та реальних рекомендацій. Всі ці заходи спрямовані на підвищення ефективності роботи СТО з урахуванням сукупності факторів, стану ринкової системи, оперативного планування постачання ЗЧ та їх просування в системі дистрибуції в межах ділової активності СТО.

На сьогодні в економічній ситуації України вимагають дистрибуційні системи переглянути їх методи постачання ЗЧ на СТО для забезпечення належного рівня працездатності транспортних засобів(ТЗ).

Варто зазначити, що використовується нормативний підхід до рівня забезпечення системою дистрибуції СТО запасними частинами. При цьому процес постачання ЗЧ ґрунтується на нормативній документації. Як показує практика нормативний метод не завжди успішним, оскільки містить методики планування з використанням елементів прикладної математики: теорії ймовірностей, математичної статистики, теорії масового обслуговування та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні в Україні успішно функціонує система матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) [3]. Раніше основними постачальниками запасних частин (ЗЧ) та експлуатаційних матеріалів були мережеві державні склади. Перехід від централізованої до ринкової системи постачання автокомпонентів здійснювався з урахуванням досвіду зарубіжних виробників автомобілів та постачальників. У результаті сучасна система МТЗ в Україні значною мірою відповідає міжнародним стандартам [4].

На одному з етапів переходу було залучено іноземних виробників, які адаптували систему постачання відповідно до свого досвіду та особливостей українського ринку [5,6]. Головним завданням будь-якої сучасної дилерської мережі є створення сприятливих умов для клієнтів, що забезпечують їхнє повне задоволення [1,6]. Такий підхід сприяє формуванню позитивного іміджу торгової марки та підвищенню рівня продажів.

Досягнення цільових показників дилерів залежить від надання якісного післяпродажного обслуговування, що є ключовим критерієм задоволеності клієнтів. Це, своєю чергою, потребує ефективної системи постачання автокомпонентів. Організація роботи дилерської мережі автосервісів як в Україні, так і за кордоном, ґрунтується на єдиних принципах. Центральний склад дистрибуційної системи виробника автомобілів та компонентів зазвичай містить до 85% номенклатури ЗЧ, необхідних для обслуговування транспортних засобів у зоні його впливу. Далі робота організовується через регіональні склади, які забезпечують безперебійну роботу дилерських центрів протягом кількох місяців [7].

Однією з ключових вимог для функціонування дистрибуційної системи є використання оригінальних ЗЧ. Вони вважаються такими, якщо їх виробник є офіційним постачальником вузлів або агрегатів для заводів-виробників конкретних марок автомобілів [8].

Попри численні переваги офіційної системи постачання, вона має і певні недоліки [9,10]:

- тривалі терміни виконання замовлень (до 5 тижнів) при доставці із центрального складу виробника;
- зростання конкуренції з боку виробників аналогів та оптових постачальників неоригінальних ЗЧ;
- залежність від актуальних даних щодо кількості автомобілів певної марки в регіоні;
- обмежена цінова політика офіційних дистриб'юторів;
- залежність дилерів від регіональних та центральних складів дистриб'юторської системи.

Питання забезпечення автомобільного ринку ЗЧ розглянуто в працях як вітчизняних, так і зарубіжних авторів, проте науково обґрунтовані методи визначення потреб у ЗЧ та вибору критичних елементів транспортних засобів ще не повністю

розроблені [11-13].

Відмова від централізованої вертикальної системи забезпечення ЗЧ сприяла формуванню горизонтальних зв'язків між підприємствами. Перевагами такої системи є зниження надлишкових запасів ЗЧ, усунення дефіциту та неліквідних позицій. Водночас зростання транспортних витрат і ризик простою автомобілів через нестачу необхідних деталей створюють певні труднощі [14].

Основною відмінністю системи постачання ЗЧ в Україні від зарубіжної є велика кількість посередницьких організацій, що виникла через стихійний розвиток ринку та відносно низький рівень доходів населення [15]. Останнім десятиліттям система постачання автомобілів ЗЧ зазнала значних змін, сформувалася багатоканальна взаємодія між учасниками ринку, а дилерські мережі виробників стали міцнішими [16].

Посилення конкуренції з боку незалежних підприємств автосервісу (приватні СТО та майстерні) вплинуло на дилерські центри [17]. Забезпечення ЗЧ таких підприємств здійснюється через офіційних постачальників, дилерські мережі, незалежні магазини, ринки та продавців уживаних ЗЧ. Низькі ціни на послуги незалежних СТО (до 2–2,5 разів дешевші, ніж у дилерських центрах) сприяють їхній популярності серед споживачів.

Важливу роль у системі постачання відіграють незалежні субпостачальники, що виготовляють комплектуючі для заводів-виробників [18,19]. Вони постачають ЗЧ через дилерські мережі, оптові компанії та незалежні магазини.

Основними конкурентами офіційних дилерів залишаються виробники аналогів та продавці уживаних ЗЧ [20,21]. Крім того, значна кількість агентських фірм відіграє роль посередників між виробниками та споживачами, реалізуючи ЗЧ як оптом, так і в роздріб [22,23].

У сучасних умовах агентські фірми та системи дистрибуції активно використовують інтернет-ресурси. Онлайн-магазини з каталогами ЗЧ та їх аналогів забезпечують зручний пошук і можливість самостійного замовлення з доставкою. Такий підхід дозволяє агентським фірмам конкурувати з дилерськими мережами та займати лідерські позиції на ринку автомобільних ЗЧ.

Постановка завдання. Метою дослідження є з'ясування методів визначення потреб у ЗЧ та розробка методики забезпечення деталей, вузлів, систем, агрегатів легкових автомобілів, що лімітують їх працездатність для впровадження її в мережу станцій техобслуговування з системою дистрибуції постачання запасних частин та розробка інноваційних рішень. Для реалізації мети в роботі розв'язувались наступні завдання:

1. Обґрунтувати методи визначення відмов автомобілів на підприємствах СТО та потреб в запасних частинах автомобілів в системі дистрибуції;

2. Розробити методику визначення та постачання деталей, вузлів, систем, агрегатів легкових автомобілів, що обмежують їх працездатність.

Викладення основного матеріалу. Пропонується розділення системи автосервісу на три групи в залежності від кількості постів обслуговування. Важливим фактором є і те, що запропоновано методику поділу всієї номенклатури наявних ЗЧ та агрегатів на три групи: А, В, С відповідно. Даний метод широко відомий і досі застосовується на практиці при узгодженні і управлінні потребою ЗЧ мереж системою автосервісу та системою дистрибуції ЗЧ. Суть даного поділу всієї номенклатури ЗЧ полягає в наступному.

Група А являє собою деталі, вузли та агрегати, що мають високий попит на даному пункті обслуговування та ремонту. Залежно від підприємства автосервісу частка таких ЗЧ із загальної номенклатури становить від 10 до 20%. Мається на увазі,

що цей перелік деталей найчастіше виходив з ладу і група деталей дозволяє усувати більшу частину несправностей, а вартість цих деталей може досягати до 75-85% від загальної вартості всієї номенклатури ЗЧ, споживаних підприємством автомобільного сервісу.

До групи В включені деталі, вузли та агрегати середнього попиту. До неї віднесено близько 30% загальної номенклатури ЗЧ. Вартість цієї частини ЗЧ не перевищує 30% загальної вартості всієї номенклатури ЗЧ, що споживається підприємством.

До групи С відносяться виключно деталі, що мають рідкісний попит (понад 60% загальної номенклатури ЗЧ). Зазвичай вартість деталей, вузлів або агрегатів, віднесених до цієї групи, не перевищує 7% загальної вартості всього асортименту ЗЧ, що споживається автосервісним підприємством.

Розподіл ЗЧ за групами ґрунтується насамперед на показниках статистики їхньої витрати за попередній звітний період. Також обов'язково враховуються такі показники, як: поточний показник попиту на кожну номенклатуру та характер його руху за умов існуючої системи дистрибуції.

Пропонується визначати потребу у ЗЧ автосервісу в такий спосіб. Необхідна кількість ЗЧ визначається по кожному окремому типу ТЗ залежно від його віку. Потім запланована кількість ТЗ, очікуваних до відвідування сервісного центру, множиться на заплановану кількість ЗЧ необхідних до виконання операцій технічного обслуговування і ремонту (ТОіР). Таким чином, для визначення рівня потреби підприємства автомобільного сервісу має бути визначено виходячи зі структури парку ТЗ, а саме їх кількості та віку, у т.ч. обсягу ЗЧ споживаних підприємством під час провадження виробничої діяльності, і навіть під час проведення робіт ТО і поточного ремонту (ПР).

Нормативне значення питомої потреби в запасних частинах (ЗЧ) для підприємств автомобільного сервісу, таких як СТО, визначається через нормативне число ЗЧ Q_{inop} . Це значення встановлюється відповідно до номенклатурних норм A_{inop} та розраховується для певної кількості автомобілів, що перебувають у зоні обслуговування підприємства.

Фактична питома потреба у ЗЧ визначається як відношення кількості запасних частин Q_{if} , фактично витрачених на ремонт, до кількості автомобілів A_{if} , які реально пройшли обслуговування:

$$K_{inop} = \frac{Q_{inop}}{A_{inop}}, K_{if} = \frac{Q_{if}}{A_{if}}. \quad (1)$$

Коефіцієнт використання запасних частин характеризує співвідношення між фактичною витратою запасних частин та їхньою питомою потребою в мережі СТО. Він відображає ефективність використання ЗЧ у процесі технічного обслуговування та ремонту:

$$\eta = \frac{K_{if}}{K_{inop}}, \quad (2)$$

Якщо значення цього показника наближається до 1, це свідчить про оптимальність запасів ЗЧ відповідно до нормативних вимог η_n . Водночас, за таких умов зростає ризик дефіциту ЗЧ η_o , що може обмежити можливість обслуговування автомобілів і, як наслідок, зменшити їхню кількість у процесі ремонту та технічного обслуговування:

$$\eta_n \leq \eta \leq \eta_o. \quad (3)$$

Для розрахунку потреби в запасних частинах (ЗЧ) для підприємства автосервісу

необхідно визначити значення відповідних коефіцієнтів η_n , η_o , а також планову величину коефіцієнта використання ЗЧ η_n .

Планова величина коефіцієнта використання ЗЧ обчислюється за такою формулою:

$$K_{\Pi} = K_{\text{нор}} \eta_{\Pi}. \quad (4)$$

Залежність, що дозволяє визначити генеральну характеристику, базується на вибірковій характеристиці та використовує квантиль нормального розподілу U_a , відповідний обраній довірчій ймовірності α .

Формула для визначення генеральної характеристики має вигляд:

$$Q_a = \sum_{i=1}^m A_{in} \cdot K_{in} + U_a \sqrt{\sum_{i=1}^m A_{in} \cdot K_{in}}, \quad (5)$$

де A_{in} – плановане значення чисельності різного вікового складу автомобілів; K_{in} – плановане значення питомої потреби у ЗЧ того ж вікового інтервалу автомобілів.

Встановлено також залежність між пропускною спроможністю окремого поста обслуговування автомобілів, віковими характеристиками (пробігом) рухомого складу (РС) та витратами ЗЧ на підприємстві автосервісу з урахуванням його виробничої потужності.

Сукупна потреба в ЗЧ, вузлах і агрегатах j -ої номенклатури для конкретного регіону Q_p , за умови, що її визначення здійснюється на основі показників СТО регіону, становить:

$$Q_p = Q \left(1 + \frac{\sum_{n=0}^{\kappa} n_p}{\sum_{n=0}^m n_z} \right), \quad (6)$$

де n – на СТО кількість робочих постів; $\sum n_p$ – сумарна кількість робочих постів; $\sum n_z$ – на СТО сумарна кількість робочих постів.

Серед значної кількості методик визначення потреби в запасних частинах (ЗЧ) для підприємств автомобільного сервісу найбільш оптимальним є методичний підхід, заснований на поточному ринковому попиту. Основною передумовою проведення розрахунків у межах цієї методики є абсолютна достовірність вхідних даних щодо рівня попиту та особливостей функціонування системи дистрибуції ЗЧ.

Попит на ринку може зазнавати як незначних, так і критичних коливань, спричинених впливом зовнішніх факторів. Для їх компенсації зазвичай формуються певні запаси ЗЧ, вузлів і агрегатів. Однак надмірне накопичення таких запасів може призводити до утворення так званих «мертвих запасів», що негативно впливає на економічні показники підприємства.

Таким чином, сучасні методики визначення потреби в ЗЧ для мережі СТО потребують розроблення високоточної методики, яка враховуватиме широкий спектр зовнішніх факторів та їхній ступінь впливу.

У межах цього дослідження залежність потреби в ЗЧ розглядається через параметр A_n – кількість автомобілів, що потребують проведення ремонтних робіт. Однак наразі відсутня стандартизована методика визначення їх чисельності.

Формування оптимального підходу до оцінки потреби в ЗЧ автомобілів має базуватися на врахуванні року випуску ТЗ, його технічного стану, а також, менш значущого фактора – пробігу.

Витрати на проведення технічного обслуговування (ТО) та поточного ремонту (ПР) перевищують 15% від початкової вартості нового автомобіля, а витрати на

придбання ЗЧ становлять приблизно 7...8% його вартості. Під час експлуатації ТЗ виконуються ремонтні роботи, не передбачені гарантійним терміном заводу-виробника (100 тис. км пробігу або 3 роки), що включають заміну витратних ЗЧ, зокрема гальмівних колодок, щіток склоочисника та освітлювальних ламп. Сукупні витрати власника на зазначені комплектуючі та роботи з їхньої заміни, включно з ТО, становлять близько 5% від вартості автомобіля.

Значна частина підприємств автосервісу отримує основний дохід від реалізації запасних частин, зокрема шин, аксесуарів, мастильних матеріалів тощо. Це часто супроводжується наявністю у підприємства власного магазину ЗЧ. Таким чином, доходи від надання послуг з ТО та ПР легкових автомобілів можуть бути у 2...3 рази меншими за доходи від продажу ЗЧ.

Формування переліку елементів, вузлів і агрегатів легкових автомобілів, що визначають їхню працездатність, здійснюється на основі комплексного аналізу таких критеріїв:

- частота типових відмов та їх кількість на одиницю пробігу для кожної моделі автомобіля;
- ступінь впливу типових відмов на загальну працездатність транспортного засобу;
- співвідношення витрат на заміну елементів (S) і середнього напрацювання на відмову для певного типу несправностей.

Для отримання обґрунтованих результатів прийнято рішення про проведення експериментального дослідження, спрямованого на збирання фактичних даних про діяльність дилерської мережі СТО певної марки автомобілів. У результаті статистичного аналізу та формування бази даних щодо відмов, що виникають у процесі експлуатації, отримано значення середнього напрацювання на відмову, коефіцієнти варіації та інші показники, що дали змогу класифікувати відмови автомобілів цієї марки та оцінити їхню експлуатаційну надійність. За підсумками аналізу зібраних даних стало можливим визначення інтегральних і диференціальних функцій розподілу напрацювання на відмову.

Оцінювання експлуатаційних характеристик легкових автомобілів у межах дилерської мережі СТО здійснювалося із застосуванням методу послідовних переваг. Також використано методу визначення критичних елементів автомобіля на основі показників надійності, яка була доповнена та вдосконалена.

Для оцінки впливу окремих елементів автомобіля на його загальну працездатність із врахуванням наведених вище критеріїв було розроблено п'ятиетапний підхід.

На першому етапі визначається ступінь впливу типової відмови Q_1 на загальну працездатність автомобіля. У межах цього етапу аналізуються дані про класифікацію відмов, досвід експлуатації та обслуговування транспортного засобу, а також ремонтування його вузлів та агрегатів. Ступінь впливу типової відмови може бути віднесений до одного з трьох рівнів:

- Q_1 – відмова елемента, яка унеможливує подальшу експлуатацію автомобіля, переводячи його в граничний або несправний стан;
- Q_2 – відмова елемента, що спричиняє значне погіршення технічного стану автомобіля, потребує ремонту, внаслідок чого транспортний засіб переходить у несправний стан;
- Q_3 – відмова елемента, яка викликає незначне відхилення технічного стану від еталонних показників, а її усунення потребує тривалого ремонту, що відносить її до несуттєвих відмов.

2. На другому етапі, після класифікації відмов за рівнями (Q_1 , Q_2 і Q_3) для кожного елемента E_i , здійснюється бальна оцінка його впливу на загальну працездатність транспортного засобу. Ця оцінка базується на експертному аналізі та враховує критичність кожної відмови.

Крім того, на цьому етапі визначається сумарний вплив відмов усіх елементів на кожному з рівнів Q_j . При цьому значущі рівні отримують вищі бальні оцінки порівняно з менш критичними рівнями. Такий підхід дає змогу не лише визначити найуразливіші елементи автомобіля, а й ранжувати їх за пріоритетністю усунення несправностей:

$$\begin{cases} \Omega_{ij} > \sum_{k=j+1}^K \Omega_{i,k}; \\ \Omega_{\sum i} = \sum_{j=1}^m \Omega_{ij}, \end{cases} \quad (7)$$

де Ω_{ij} – бальні (вагові оцінки); i – індекс автомобільного елемента; j – індекс ступеню рівня елементного впливу, $j = \overline{1, m}$, k – індекс порядкового номера розглянутого елемента автомобілів, $k = (1, K)$; m – відмови елементів легкових автомобілів, що впливають на працездатність від кількості рівнів впливу $m = 3$; n – загальна кількість елементів, що оцінюються з позиції вимоги лімітування їх працездатності.

Застосування умови (7) передбачає визначення впливу кожної відмови окремого елемента на загальну працездатність легкових автомобілів залежно від обраної шкали оцінювання.

У межах цього етапу використовується 10-бальна шкала, оскільки вона забезпечує достатню інформативність та наочність оцінки, на відміну від 100-бальної системи, яка, хоча й має вищу точність, є менш зручною для практичного застосування. Такий вибір дає змогу ефективно класифікувати рівень впливу кожної відмови та полегшує аналіз отриманих результатів.

Звертаючи на увагу прийняття 10-ти бальної шкали оцінок впливу відмов кожного елемента E_i за рівнями Q_1 , Q_2 і Q_3 і для $j = \overline{1, m}$, $m=3$ оптимальною є така вимога до бальних оцінок впливу елементів на працездатність легкових автомобілів: оцінки мають відповідати рівню критичності відмови та її впливу на загальну функціональність легкових автомобілів:

$$\Omega_{i1} = 10; \Omega_{i2} \cap \Omega_{i3} = \Omega_{i2}(8;7;6;5) \cap \Omega_{i3}(1;2;3;4). \quad (8)$$

Визначення бальних оцінок Ω_{i2} , Ω_{i3} та оцінки впливу елемента на працездатність легкових автомобілів відповідно до обраної шкали здійснюється шляхом експертного опитування групи фахівців, безпосередньо пов'язаних із діяльністю автосервісного підприємства. Упорядкування отриманих оцінок виконується за допомогою виразу (7), що дозволяє узагальнити вагові оцінки Ω_{ij} для кожного елемента E_i із заданої множини $\{E_i\}_{i=1}^n$:

$$\Omega_{\sum i} = \sum_{j=1}^m \Omega_{ij}. \quad (9)$$

У результаті підсумовування отриманих оцінок стає можливим упорядкування значень для кожного елемента шляхом визначення його рейтингової позиції. Це, у свою чергу, дає змогу здійснити початкову ідентифікацію найбільш критичних елементів з метою забезпечення загальної працездатності легкових автомобілів:

$$\lambda_{\Omega_i} = \begin{cases} \min, \text{ для } \Omega_{\sum i} \Rightarrow \max; \\ \max, \text{ для } \Omega_{\sum i} \Rightarrow \min. \end{cases} \quad (10)$$

У результаті аналізу отриманого масиву даних вагових оцінок Ω_{ij} визначаються значення математичного сподівання $\bar{\Omega}$, коефіцієнта варіації та середньоквадратичного відхилення $\sigma(\Omega_i)$ для обраного варіанта шкали оцінювання, визначеного у виразі (8):

$$\bar{\Omega}_i = \frac{\sum_{i=1}^m \Omega_{ij}}{m}; \sigma(\Omega_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\Omega_{ij} - \bar{\Omega}_i)^2}{m-1}}; \nu(\Omega_i) = \frac{\sigma(\Omega_i)}{\bar{\Omega}_i}. \quad (11)$$

Відмінною особливістю цього виразу є те, що, на відміну від виразів (9) та (10), індекс i позначає варіант комбінації бальних оцінок рівня значущості, а m – індекс аналізованих комбінацій, які визначаються відповідно до виразу (8).

У процесі обробки отриманого масиву бальних оцінок Ω_{ij} згідно з виразом (11) визначаються їхні статистичні характеристики та формуються комбінації бальних оцінок. Отриманий масив даних дозволяє оцінити чутливість аналізованих комбінацій. Для проведення такого аналізу використовуються парні поєднання варіантів I та II:

$$I = \{10-8; 10-7; 10-6; 10-5\}; II = \{8-1; 7-2; 6-3; 5-4\}.$$

При цьому повинна виконуватись умова:

$$\Omega_{ij} > \sum_{k=j+1}^K \Omega_{i,k}. \quad (12)$$

Згідно з виразами (7) та (12), маємо:

$$10 > 8+1=9; 8 > 1; 10 > 7+2=9; 7 > 2; 10 > 6+3=9; 6 > 3; 10 > 5+4=9; 5 > 4.$$

Для прийнятих парних поєднань I та II виконується формування масивів для: $i = \overline{(1, n)}; n = 4; j = \overline{(1, m)}; m = 3$:

$$A_i = \frac{\Omega_{i,j}}{\Omega_{i,j+1}}; \quad (13)$$

$$B_i = \frac{\Omega_{i,j+1}}{\Omega_{i,j+2}}. \quad (14)$$

Обробка масивів парних поєднань I - $\{A_i\}$ і II - $\{B_i\}$ дає змогу, відповідно до відомих положень математичної статистики, оцінити математичні сподівання \bar{A} і \bar{B} , середньоквадратичні відхилення $\sigma(A)$ і $\sigma(B)$, а також коефіцієнти варіації $\nu(A)$ та $\nu(B)$. Крім того, виконується нормування значень A_i і B_i за середньоквадратичними відхиленнями $\sigma(A)$ і $\sigma(B)$, що дозволяє визначити їх нормовані значення A_i^H і B_i^H :

$$A_i^H = \frac{A_i}{\sigma(A)}; \quad (15)$$

$$B_i^H = \frac{B_i}{\sigma(B)}. \quad (16)$$

Подальша обробка масивів нормованих вагових оцінок A_i^H і B_i^H дає змогу визначити для них такі показники:

– значення математичного очікування $\bar{D} \in (\bar{D}_A \cap \bar{D}_B)$:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}, \quad (17)$$

де D_i – значення A_i^H або B_i^H ;

– значення середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma(D_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}}; \quad (18)$$

– значення коефіцієнтів варіації

$$\nu(D_i) = \frac{\sigma(D_i)}{D}; \quad (19)$$

– значення абсолютних похибок для даної довірчої ймовірності $\gamma = 0,9$

$$\xi_D = Z_\gamma \frac{\sigma(D)}{\sqrt{n}}, \quad (20)$$

де Z_γ – є нормована випадкова величина для заданої ймовірності γ ;

– значення верхньої \bar{D}^B та нижньої \bar{D}^H довірчих меж:

$$\bar{D}^{B;H} = \bar{D} \pm Z_\gamma \frac{\sigma(D)}{\sqrt{n}}; \quad (21)$$

$$\bar{D}^{B;H} \in (\bar{D}_A^{B;H} \cap \bar{D}_B^{B;H}). \quad (22)$$

Результати обробки інформації дають змогу отримати оцінки статистичних характеристик нормованих парних комбінацій, що відображають вплив відмов елементів на працездатність легкових автомобілів.

Остаточний вибір варіанта проведення аналізу впливу відмов елементів на працездатність автомобілів здійснюється за умовою:

$$C_i = (A_i^n + B_i^n) \Rightarrow \max \quad (23)$$

За результатами проведених досліджень у межах аналізу чутливості оцінок на різних рівнях формується висновок щодо найбільш оптимальної комбінації для кожного рівня впливу.

Запропонована методика реалізується відповідно до такої послідовності розв'язання задач. На основі виразу (7) для аналізованих рівнів впливу Q_1 , Q_2 і Q_3 відмов елементів E_i транспортного засобу визначаються вагові оцінки їхнього впливу Ω_{ij} на загальну його працездатність. Оцінювання здійснюється шляхом експертного опитування співробітників автосервісного підприємства, які безпосередньо займаються технічним обслуговуванням і ремонтом автомобілів.

Надалі отримані вагові оцінки підсумовуються $\Omega_{\Sigma i}$ відповідно до виразу (9) та впорядковуються за рівнем впливу відмови окремого елемента на загальну працездатність легкових автомобілів відповідно до умови (10).

3. На третьому етапі проводиться визначення статистичних показників зібраного масиву даних сумарних експертних оцінок. До таких показників належать середньоквадратичне відхилення $\sigma(\Omega_\Sigma)$ та математичне сподівання $\bar{\Omega}_\Sigma$ для відповідного масиву даних: $\{\Omega_{\Sigma i}\}, i = \overline{(1, n_Q)}$;

$$\bar{\Omega}_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n_Q} \Omega_{\Sigma i}}{n_Q}; \quad (24)$$

$$\sigma(\Omega_\Sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Q} (\Omega_{\Sigma i} - \bar{\Omega}_\Sigma)^2}{n_Q - 1}}, \quad (25)$$

де

$$\Omega_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^m \Omega_{ij}. \quad (26)$$

Потім формується масив нормованих значень $\{K_i\}$ шляхом проведення нормування математичного сподівання Ω_{Σ_i} відносно середньоквадратичного відхилення $\sigma(\Omega_{\Sigma})$:

$$K_i = \frac{\Omega_{\Sigma_i}}{\sigma(\Omega_{\Sigma})}. \quad (27)$$

4. На четвертому етапі здійснюється визначення масиву $\{S_i\}, i = \overline{(1, n_s)}$ питомих витрат на придбання елементів транспортного засобу, що вийшли з ладу, з метою забезпечення його працездатності на кожні 1000 км пробігу.

Після цього для отриманого масиву $\{S_{\Sigma_i}\}, i = \overline{(1, n_s)}$ необхідно розрахувати статистичні характеристики, зокрема середньоквадратичне відхилення $\sigma(S_{\Sigma})$ та математичне сподівання $\overline{S_{\Sigma}}$, відповідно до наведених виразів:

$$\overline{S_{\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} S_{\Sigma_i}}{n_s}; \quad (28)$$

$$\sigma(S_{\Sigma}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (S_{\Sigma_i} - \overline{S_{\Sigma}})^2}{n_s - 1}}; \quad (29)$$

де

$$S_{\Sigma_i} = \sum_{j=1}^m S_{ij}. \quad (30)$$

Тут $n_Q = n_s$.

Наступним кроком є формування масиву нормованих значень M_i шляхом нормування масиву питомих витрат S_{Σ_i} відносно середньоквадратичного відхилення $\sigma(S_{\Sigma})$:

$$M_i = \frac{S_{\Sigma_i}}{\sigma(S_{\Sigma})}. \quad (31)$$

5. На п'ятому етапі виконується відбір із вихідної множини номенклатури елементів $\{E_i\}_{i=1}^n$ легкових автомобілів найбільш критичних і значущих з огляду на наслідки їх відмови та вартість придбання заміни.

Для розв'язання цього завдання необхідно провести попередню оцінку варіацій $\nu(K)$ і $\nu(M)$ відповідних параметрів, що характеризують вплив відмови елемента та його вартість:

$$\nu(K) = \sigma(K) / \overline{K}; \nu(M) = \sigma(M) / \overline{M}, \quad (32)$$

де математичні очікування та середньоквадратичні відхилення для $\{K_i\}$ і $\{M_i\}$ дорівнюють:

$$\overline{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n_Q} K_i}{n_Q}; \quad (33)$$

$$\Sigma(K) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Q} (K_i - \overline{K})^2}{n_Q - 1}}; \quad (34)$$

$$\overline{S} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} M_i}{n_s}; \quad (35)$$

$$\sigma(M) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (M_i - \bar{M})^2}{n_s - 1}}. \quad (36)$$

У разі дотримання умови, за якої варіація $v(K)$ або $v(M) < 0,4$ відповідає визначеним критеріям, для ідентифікації критичних елементів, що забезпечують працездатність легкових автомобілів, застосовуються порогові значення нижніх довірчих меж \bar{K}_γ^H і \bar{M}_γ^H , що відповідають нормальному закону розподілу відповідних параметрів.

Якщо ж умова щодо варіації $v(K)$ або $v(M) < 0,4$ не виконується, тобто $v(K)$ або $v(M) \geq 0,4$ – виходять за межі допустимих значень, тоді застосовується закон гамма-розподілу. Найчастіше гамма-розподіл використовується в процесі постачання запасних частин, вузлів та агрегатів легкових автомобілів у дистрибуційних системах та на станціях технічного обслуговування в умовах підвищеної інтенсивності використання за певний період.

Для нормального закону розподілу нижні довірчі межі K_i і M_i визначаються за такими формулами:

$$\bar{K}_\gamma^H = \bar{K} - Z_\gamma \frac{\sigma(K_i)}{\sqrt{n_K}}; \quad (37)$$

$$\bar{M}_\gamma^H = \bar{M} - Z_\gamma \frac{\sigma(M_i)}{\sqrt{n_M}} \quad (38)$$

Для гамма-розподілу нижні довірчі межі K_i і M визначаються за виразами:

$$\bar{K}_\gamma^H = \bar{K} - U_\gamma \cdot \frac{\bar{K}}{\sqrt{\eta_K \cdot n_K}}; \quad (39)$$

$$\bar{M}_\gamma^H = \bar{M} - U_\gamma \cdot \frac{\bar{M}}{\sqrt{\eta_M \cdot n_M}}. \quad (40)$$

У рівняннях (37) та (40) маємо: γ – довірна ймовірність (як правило, $\gamma \geq 0,9$); Z_γ – нормована випадкова величина, що відповідає заданій ймовірності γ ; U_γ – квантиль нормального розподілу.

Параметри форми гамма-розподілу для множин $\{K_i\}$ та $\{M_i\}$ визначаються за такими співвідношеннями:

$$\eta_K = \frac{\bar{K}^2}{\sigma^2(K)}; \quad (41)$$

$$\eta_M = \frac{\bar{M}^2}{\sigma^2(M)}. \quad (42)$$

У результаті визначаються значення нижніх довірчих меж K_γ^H і M_γ^H , що дає змогу здійснити відбір номенклатури елементів, які впливають на працездатність легкових автомобілів. Цей відбір проводиться як з огляду на рівень впливу, так і з урахуванням найбільших питомих витрат, необхідних для усунення відповідної несправності. Відбір за цими параметрами здійснюється відповідно до наступної умови:

$$K_i \geq \bar{K}_\gamma^H; M_i \geq \bar{M}_\gamma^H. \quad (43)$$

При цьому в межах формулювання зазначених умов може виконуватися така залежність $n_K = n_M$ або ж умова $n_K \neq n_M$.

Якщо для заданої умови $K_i \geq \bar{K}_\gamma^H$ кількість елементів $n_Q = n_K$ не збігається з числом елементів $n_S = n_M$ у порівняльній множині, то виконується відповідна залежність $M_i \geq \bar{M}_\gamma^H$, і (або) спостерігається розбіжність у номенклатурі елементів та їх кількості для задоволення умови (43). Одночасно для множин K_i та M_i (і/або) виділяються елементи, які характеризуються високими значеннями K_i і низькими значеннями M_i (або навпаки). У такому випадку виникає необхідність здійснення додаткових процедур щодо відбору елементів легкових автомобілів.

З урахуванням накладання подій K і M та застосування принципу невизначеності Лапласа, який припускає рівнозначний вплив обох критеріїв, визначається загальний вплив кожного елемента транспортного засобу. Це впливає на його працездатність одночасно за двома параметрами: рівнем впливу конкретного елемента у разі його відмови та витратами, необхідними для усунення відповідної несправності:

$$R_i = K_i \cdot M_i. \quad (44)$$

Далі здійснюють розрахунок нижніх довірчих меж \bar{R}_γ^H за виразом:

$$\bar{R}_\gamma^H = \bar{R} - U_\gamma \frac{\bar{R}}{\sqrt{\eta_R + n_R}}, \quad (45)$$

де η_R – відображає форму розподілу R_i показника з дотриманням пронормованих значень критеріїв K_i і M_i . Одночасно за (44), η_R набуває вигляду:

$$\eta_R = \frac{\bar{R}^2}{\sigma^2(R)}. \quad (46)$$

На завершальному етапі відбувається ідентифікація елементів, що обмежують працездатність легкових автомобілів відповідно до встановлених умов:

$$R_i \geq \bar{R}_\gamma^H; \quad (47)$$

$$n_R \leq \begin{cases} n_K = n_M; \\ n_K \neq n_M. \end{cases} \quad (48)$$

Зазначені умови відповідають критеріям визначення найбільш "критичних" елементів, що обмежують працездатність легкових автомобілів.

Розроблену методику було апробовано на прикладі легкових автомобілів марки Renault. Вона забезпечує достовірне визначення елементів, які лімітують працездатність автомобіля. Крім того, методика дозволяє прогнозувати потребу у запасних частинах для підтримання заданого рівня працездатності транспортного засобу, а також сприяє підвищенню ділової активності підприємства.

Висновки

1. Визначено наукові методи, які дають можливість підібрати номенклатуру деталей, що обмежують ресурс легкових автомобілів.

2. Отримано статистичні характеристики експлуатаційної надійності елементів легкових автомобілів (оцінок математичного очікування та середньоквадратичного відхилення напрацювань на відмови елементів), абсолютних та питомих витрат на запасні частини при відновленні їх працездатності.

3. Розроблено методику оптимізації потреби в запасних частинах критичних за працездатністю в рамках дистриб'юторської системи та системи автосервісу, з урахуванням економічної кон'єктури, умов експлуатації, інтенсивності та

працездатності легкових автомобілів. Виділено п'ять етапів реалізації запропонованої методики.

4. Проведено оцінку ефективності та практичної значущості впровадження методики, використання якої уможливіє зниження витрат та втрат на підтримку працездатності автомобілів марки Renault, як для власників автомобілів, так і для дилерських сервісних центрів у діапазоні від 10,0% до 16,2 %.

Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Кузик О.В., Тертиця О.М., Байцан В.Г. Система сервісного обслуговування транспортної та сільськогосподарської техніки дилерським центром в агропромислому виробництві. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції "Крамаровські читання" з нагоди 117-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 22-23 лют. 2024 р., м. Київ. К. : Видавничий центр НУБіП України, 2024. С. 108 – 110.
2. Аулін В.В., Гриньків А.В., Сергійчук А.А., Ляшук О.Л. Використання ймовірно-логічного діагностування технічного стану машин в розробці системи технічного обслуговування і ремонту. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції "Крамаровські читання" з нагоди 117-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 22-23 лют. 2024 р., м. Київ. К. : Видавничий центр НУБіП України, 2024. С. 103 – 105.
3. Аулін В.В., Ляшук О.Л., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Міронов Д.В., Слободян Л.М., Рогатинський Р.М. Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин. *Збірник наукових праць. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. № 8(39), т. II. 2023. С. 175- 189.
4. Аулін В.В., Лівіцький О.М., Голуб Д.В. Вплив стратегій технічного обслуговування і ремонту мобільної сільськогосподарської техніки на її стан, умови і охорону праці операторів. *Вісник Житомирського національного аграрно-екологічного університету: науково-теоретичний збірник.* 2014. Вип. № 2 (45), т. 4, ч. II. С. 37-50.
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Головатий А.О., Дьяченко В.О. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Technical service of agriculture, forestry and transport systems.* 2020. №22. С. 162 – 174.
6. Poliakov A., Antonyuk O., Ratsyborynskiy V. Identification of improvement ways of estimation method for nomenclature and quantity of spare parts. *Tehnomus. New technologies and products in machine manufacturing technologies. Journal.* 2013. No. 20. P. 34 - 39.
7. Поляков А. П., Антонюк О. П. Аналіз факторів, які впливають на формування номенклатури та кількості запасних частин автотранспортного підприємства. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.* 2011. №6 (160). С. 139 - 143.
8. Поляков А. П., Антонюк О. П., Галушак Д. О. Організація забезпечення запасними частинами автотранспортних підприємств. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник.* 2012. Вип. 36. С. 238-240.
9. Поляков А. П., Галушак Д. О., Галушак О. О., Антонюк О. П. Метод формування необхідної кількості запасних частин для ремонту засобів транспорту. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету.* 2012. № 2. URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/325>.
10. Антонюк О. П., Баранов А. М., Коробов С. С., Марянюк Б. С. Обґрунтування вихідних принципів розробки методу формування номенклатури та кількості запасних частин. *Вісник Житомирського державного технологічного університету.* Серія: Технічні науки. 2014. №2 (69). С. 10 - 15.
11. Біліченко В. В., Антонюк О. П. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності вибору запасних частин, що зберігаються на складі АТП для підтримки в справному стані його рухомого складу. *Вісник Житомирського державного технологічного університету.* Серія: Технічні науки. 2016. №2 (77). С. 56 - 61.
12. Антонюк О. П. Аналіз методів визначення номенклатурних груп запасних частин. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт.* 2013. №142. С. 181 - 183.
13. Біліченко В. В., Макаров В. А., Макарова Т. В., Антонюк О. П. Характеристика концепції щодо впровадження раціонального забезпечення регіонального вантажного АТП запасними частинами. *Вісник Житомирського державного технологічного університету.* Серія: Технічні науки. 2018. № 2 (82). С. 21 - 24.
14. Біліченко В. В., Макаров В. А., Макарова Т. В., Антонюк О. П. Про раціональний підхід до забезпечення запасними частинами вантажних АТП регіону. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань "Технічні науки").* 2018. Вип. 62. С. 29 - 35.

15. Кравченко О. П., Верітельник Є. А. Щодо визначення критерію необхідності зберігання запасних частин на складі автотранспортного підприємства. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*, 2014. № 2–3. С. 19–26.
16. Субочев О. І., Завалій Т. А., Погорелов М. Г. Удосконалення забезпечення запасними частинами сервісних підприємств. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С. 58–67.
17. Кашканов А.А., Москалюк М.Л. Методи обґрунтування запасів запасних частин у системі управління транспортним процесом. *Вісник машинобудування та транспорту*, 2024. 19(1), 68–74.
18. Антонюк О. П. Покращення процесу забезпечення запасними частинами рухомого складу автотранспортного підприємства: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20. Житомир, 2021. 24 с.
19. Vacchetti A., Sacconi N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*. Volume 40, Issue 6, December 2012, P. 722-737.
20. Bondarenko, E., Dryuchin, D., Goncharov, A., Bulatov, S., Feklin, E. (2023). Improving the Efficiency of Vehicle Operation by Defining the Organizational and Methodological Parameters of the Spare Parts Incoming Inspection System. In: Guda, A. (eds) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 509. Springer, Cham.
21. Strelnikov V.P., Strelnikov P.V. Defining the nomenclature of the spare parts sets and calculating the number of single sets of spare parts. *Mathematical machines and systems*. 2022. N 2. С. 83–90.
22. Коробочка О.М., Чернишов О.В., Трикіло А.І., Бурінчик О.О. Моделювання складських запасів на станціях технічного обслуговування автомобілів. *Математичне моделювання*. 2023. №2 (49). 133-141.
23. TecDoc Catalogue by TecAlliance. URL: <https://web.tec Alliance.net/uk/home> (дата звернення: 12.03.2025).

References

1. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Kuzyk, O. V., Tertytsia, O. M., & Baetsan, V. H. (2024). System of service maintenance of transport and agricultural machinery by a dealer center in agro-industrial production. *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Kramarov Readings" on the 117th Anniversary of the Birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-President of UASGN Volodymyr Savovich Kramarov (1906-1987), February 22-23, 2024, Kyiv*, 108–110 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Serhiichuk, A. A., & Liashuk, O. L. (2024). Use of probabilistic-logical diagnostics of machine technical condition in developing a system for maintenance and repair. *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Kramarov Readings" on the 117th Anniversary of the Birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-President of UASGN Volodymyr Savovich Kramarov (1906-1987), February 22-23, 2024, Kyiv*, 103–105 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Liashuk, O. L., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., Mironov, D. V., Slobodyan, L. M., & Rohatynskiy, R. M. (2023). Optimal maintenance and repair operations complex for increasing the reliability of nodes, systems, and aggregates of mobile machines. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 8(39), part II, 175–189 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Lvivitskiy, O. M., & Holub, D. V. (2014). Impact of maintenance and repair strategies for mobile agricultural machinery on its condition, operator working conditions, and labor safety. *Bulletin of Zhytomyr National Agro-Ecological University: Scientific-Theoretical Collection*, 2(45), 4, 37–50 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., Lvivitskiy, O. M., Holovaty, A. O., & Diachenko, V. O. (2020). Principles of constructing and functioning of a cyber-physical system for service maintenance of automotive and mobile agricultural machinery. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry, and Transport Complexes*, 22, 162–174 [in Ukrainian].
6. Poliakov, A., Antonyuk, O., & Ratsyborynskiy, V. (2013). Identification of improvement ways of estimation method for nomenclature and quantity of spare parts. *Tehnomus. New technologies and products in machine manufacturing technologies. Journal*, 20, 34–39.
7. Poliakov, A. P., & Antonyuk, O. P. (2011). Analysis of factors affecting the formation of the nomenclature and quantity of spare parts in road transport enterprises. *Bulletin of the East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl*, 6(160), 139–143 [in Ukrainian].
8. Poliakov, A. P., Antonyuk, O. P., & Halushchak, D. O. (2012). Organization of spare parts supply for road transport enterprises. *Scientific Notes. Inter-university Collection*, 36, 238–240 [in Ukrainian].
9. Poliakov, A. P., Halushchak, D. O., Halushchak, O. O., & Antonyuk, O. P. (2012). Method for determining the necessary quantity of spare parts for transport repair. *Scientific Works of the Vinnytsia National Technical University*, 2 [in Ukrainian].
10. Antonyuk, O. P., Baranov, A. M., Korobov, S. S., & Maryanko, B. S. (2014). Justification of the basic principles for developing a method for forming the nomenclature and quantity of spare parts. *Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences*, 2(69), 10–15 [in Ukrainian].
11. Bilychenko, V. V., & Antonyuk, O. P. (2016). Justification of criteria for evaluating the effectiveness of

- selecting spare parts stored in road transport enterprise warehouses to maintain its fleet in working condition. *Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences*, 2(77), 56–61 [in Ukrainian].
12. Antonyuk, O. P. (2013). Analysis of methods for determining the nomenclature groups of spare parts. *Bulletin of SevNTU. Series: Machine Engineering and Transport*, 142, 181–183 [in Ukrainian].
 13. Bilychenko, V. V., Makarov, V. A., Makarova, T. V., & Antonyuk, O. P. (2018). Characteristics of the concept of rational supply of regional freight road transport enterprises with spare parts. *Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences*, 2(82), 21–24 [in Ukrainian].
 14. Bilychenko, V. V., Makarov, V. A., Makarova, T. V., & Antonyuk, O. P. (2018). On a rational approach to ensuring spare parts supply for freight road transport enterprises in the region. *Scientific Notes. Inter-university Collection (by fields of knowledge "Technical Sciences")*, 62, 29–35 [in Ukrainian].
 15. Kravchenko, O. P., & Verityelnick, E. A. (2014). On defining the criterion for the necessity of storing spare parts in a road transport enterprise's warehouse. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*, 2–3, 19–26 [in Ukrainian].
 16. Subochev, O. I., Zavaley, T. A., & Pohorielov, M. H. (2019). Improving spare parts supply for service enterprises. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1(32), 58–67 [in Ukrainian].
 17. Kashkanov, A. A., & Moskaliuk, M. L. (2024). Methods of justifying spare parts stocks in the transportation process management system. *Bulletin of Machine Engineering and Transport*, 19(1), 68–74 [in Ukrainian].
 18. Antonyuk, O. P. (2021). Improvement of the spare parts supply process for the rolling stock of a road transport enterprise (Doctoral dissertation). Zhytomyr [in Ukrainian].
 19. Bacchetti, A., & Saccani, N. (2012). Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 40(6), 722–737 [in Ukrainian].
 20. Bondarenko, E., Dryuchin, D., Goncharov, A., Bulatov, S., & Feklin, E. (2023). Improving the efficiency of vehicle operation by defining the organizational and methodological parameters of the spare parts incoming inspection system. In A. Guda (Ed.), *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022* (pp. 509). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27953-7_41.
 21. Strelnikov, V. P., & Strelnikov, P. V. (2022). Defining the nomenclature of the spare parts sets and calculating the number of single sets of spare parts. *Mathematical Machines and Systems*, 2, 83–90.
 22. Korobochka, O. M., Chernyshov, O. V., Trykilo, A. I., & Burinchyk, O. O. (2023). Modeling warehouse inventory at vehicle service stations. *Mathematical Modeling*, 2(49), 133–141 [in Ukrainian].
 23. TecDoc Catalogue by TecAlliance. (n.d.). *TecDoc Catalogue*. Retrieved March 12, 2025, from <https://web.tecalliance.net/uk/home>.

Serhii Tyshchenko, Andrii Serhiichuk, Viktor Aulin, Prof., DSc.,

Andrii Hrynkiv, Senior Researcher, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methods for Determining the Needs of Car Service Enterprises in Spare Parts and Developing a Methodology for Their Impact on the Overall Performance of Cars

The article is devoted to methods of determining the needs of a car service enterprise in spare parts and the article is devoted to methods of determining the needs of a car service enterprise in spare parts and developing a methodology for their selection and impact on the overall performance of passenger cars. The groups of the spare parts nomenclature are considered.

A number of statistical indicators, actual and regulatory needs of a car service enterprise in spare parts are determined. Their utilization coefficient is determined. A methodology for assessing the degree of influence of an element (part, assembly, system, unit) of a car on its performance is developed.

Five stages of implementation of the methodology are proposed. At the first stage, the influence of resource-determining failures on the condition of the car is determined. At the second stage, the impact of failures of parts, assemblies, systems and units in points on the overall performance of the car is assessed. At the third stage, statistical indicators of the collected array of expert assessment databases are determined. At the fourth stage, the array of costs for purchasing spare parts in the distribution system is determined in order to maintain the performance of the car. At the fifth stage, the task of selecting from the initial nomenclature of passenger car elements the most critical and significant in terms of the consequences of failure and the cost of their acquisition is solved.

The corresponding conditions for determining the elements that significantly limit the performance of passenger cars are formulated. The methodology has been tested on Renault passenger cars.

passenger car, technical condition, failure, element, spare part, impact assessment methodology, car performance

Одержано (Received) 14.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 19.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

УДК 628.08

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.258-262](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.258-262)**С. В. Філатов**, доц., канд. техн. наук, **І. С. Водоп'янов***Криворізький державний педагогічний університет, м. Кривий Ріг, Україна**e-mail: felixfilatovsergey@gmail.com, vodopianov.ivans@gmail.com*

Вплив температурних напружень, що виникають в циліндро-поршневій групі при експлуатації автомобілів

Дослідження присвячене ефективності та вдосконаленню конструкцій двигунів автомобільного транспорту, зменшенню обсягу витрат палива при їх роботі. Хронологічні рамки досліджуваних наукових статей – 2020-2024 рр.

Авторами проведений аналіз з досліджуваної теми з посиланням на досвід зарубіжних компаній. У статті наведено короткий опис функціоналу програми для підвищення тягових якостей великовантажних кар'єрних автосамоскидів. Авторами розглянуті і наведені графіки впливу напружень на циліндр, їх концентрацію і значень з використанням методу граничних елементів. Проведений аналіз напружень поршня в залежності від його геометричних форм.

Авторами було проведено математичне дослідження в галузі автомобільного транспорту на основі методу граничних елементів. На основі отриманих результатів доцільно використовувати вказану програму для підвищення ефективності використання палива в секторі автомобільного транспорту з метою енергозбереження та орієнтацію на зниження витрат транспортних підприємств.

граничні контури, граничні елементи, польові точки, напруження, ізолнії

Постановка проблеми. Одним із напрямків ефективного використання палива є удосконалення конструкції двигуна, тобто зменшення витрат на тертя в циліндро-поршневій групі. Відомо, що витрати на тертя в циліндро-поршневій групі складають більшу частину від інших витрат двигуна внутрішнього згорання. Це пов'язано із значними механічними і тепловими навантаженнями. Також потрібно враховувати, що поршні рухаючись прямолінійно в циліндрах зазнають знакозмінні навантаження, які призводять до зносу як циліндрів так і поршнів у поздовжньому та поперечному перерізі. Це свідчить про те, що поршень і циліндр двигуна внутрішнього згорання має овальність та конусність. Овальність циліндра спостерігається коли в процесі експлуатації на нього діють значні поперечні сили, які прижимають поршень до дзеркала циліндра. Як правило овальність відбувається по осі, перпендикулярній осі поршневого пальця. [4]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Посилаючись на американські компанії таких фірм як «CRISS», «VICON MARIO», «WABCO» та «TEREX», які більше звертають увагу на раціональне підвищення тягових якостей великовантажних кар'єрних автосамоскидів, ніж до збільшення питомої потужності двигуна, за рахунок зменшення тертя в циліндро-поршневій групі, хочеться звернути увагу на програму «Taxis», що працює в дослідженні даного напрямку.

«Taxis» - це програма, що розроблена Європейським Союзом для Нових Незалежних держав і Монголії з метою прискорити розвиток гармонічних і взаємовигідних економічних і політичних зв'язків між Європейським Союзом і цими країнами.

З 2020 р. в Україні споживання палива автотранспортом склало близько 6,4 мільйона тон нафтового еквіваленту. Ця цифра може збільшитися у 2,5 рази і досягнути значення, приблизно, 16 мільйонів тон в 2030 р., якщо підтвердяться прогнози енергетичних споживачів. Таким чином, переходячи до вільної ринкової економіки, Україні потрібно здолати додаткові економічні труднощі, що викликані значними додатковими енергетичними витратами у збиток торгівельному балансу.

© С. В. Філатов, І. С. Водоп'янов, 2025

Тому в Україні розпочалося проведення реформ енергетичного сектору, заснованого на застосування цінової політики, що відображає справжню вартість енергії; прийнятті Закону про збереження енергії; створенні Державного Комітету по енергозбереженню. Крім того був розпочатий проект в рамках програми «Tacis»: розробка заходів по підвищенню ефективності використання палива в секторі автотранспорту. Він має метою надання допомоги українському уряду в розробці підходящих рамок для втілення енергозберігаючих акцій, орієнтованих на комерційні транспортні колективні підприємства і власників приватних автомобілів.

Застосовуючи математичну модель за допомогою метода граничних елементів можна визначити напружено-деформований стан елементів циліндро-поршневої групи.

Всі граничні контури апроксимуються прямолінійними відрізками, що примикають один до одного. По даним у програмі автоматично розраховуються координати центрів, довжини й орієнтації граничних елементів. Програма припускає використання не більше 50 граничних елементів. У цілому кращі результати одержують, коли всі граничні елементи мають приблизно однакову довжину. При завданні координат x , y кінців граничного відрізка необхідно враховувати правило обходу межі; замкнутий контур обходимо проти ходу годинникової стрілки, якщо область, що розглядається, лежить поза контуром, і по ходу годинникової стрілки, якщо область, що розглядається, лежить всередині контуру. [1]

Програма має два обмеження, пов'язані з розташуванням граничних елементів у задачах, що володіють симетрією: граничні елементи не можуть лежати уздовж лінії симетрії і не можуть перетинати її. Наприклад, якщо один кінець елемента лежить на лінії симетрії, то інший повинен лежати поза цією лінією. Польові точки, проте, можуть бути обрані уздовж лінії симетрії.

Програма дозволяє працювати з будь-якою послідовною системою одиниць виміру, наприклад у системі СІ. Вхідні значення для граничних зміщень, якщо вони є, повинні бути задані в тих же одиницях виміру, що використовувалися при завданні координат точок, а вхідні значення напружень на межі і початкових напружень, якщо вони мають у тих же одиницях, у яких задається модуль Юнга. Обчислені значення зміщень і напружень тоді будуть мати відповідні одиниці виміру.

Програма побудована таким чином, що всі необхідні вхідні дані вводяться через текстовий файл даних або безпосередньо в зазначений рядок програми. Файл даних «DATAN. txt» створюється за допомогою будь-якого текстового редактора спроможного зберегти файл у форматі «*. txt». У одному рядку файлу повинно міститися тільки одне значення вихідних даних. Дані вводяться в наступному порядку:

Програма містить головну програму і три підпрограми. Головна програма управляє усіма вхідними і вихідними операціями, а також містить логічні операції, необхідні для визначення положення граничного елемента, побудови системи алгебраїчних рівнянь і обчислення невідомих граничних параметрів, зміщень або зусиль, а також зміщення і напруження в усіх внутрішніх точках через компоненти фіктивних навантажень на усіх граничних елементах. Обчислення коефіцієнтів впливу зміщення та напруження для граничних f_i внутрішніх польових точок реалізуються в підпрограмі COEFF, а результати використовуються в головній програмі. Підпрограма INITL використовується на початку цих обчислень у випадках, коли враховуються умови симетрії, так, що уявлювані граничні елементи породжуються усередині програми. Операції з уявлюваними елементами відбуваються шляхом послідовного звертання до підпрограми COEFF після відповідного визначення координат і орієнтації уявлюваних елементів. Підпрограма SOLVE вирішує систему алгебраїчних рівнянь, побудовану в головній програмі. Процедура розв'язання побудована на методи

виключення Гауса без вибору ведучого елемента.

У кожній задачі визначалися поле напружень і зони можливих руйнувань циліндра, а також максимально досягнуте значення критерію Морю в циліндрі.

Особливості зміни напруженого стану циліндра при дії на нього горизонтальних, вертикальних та дотичних напружень представлені на рис. 1-3.

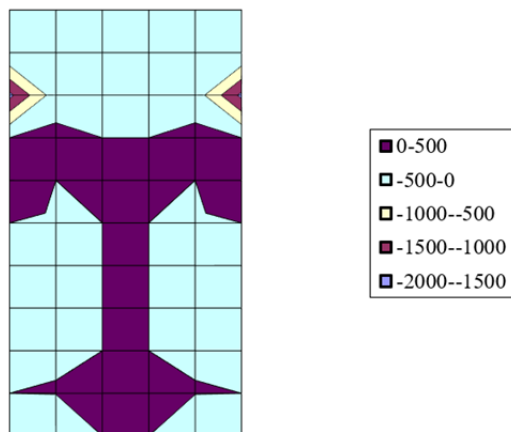


Рисунок 1 – Ізолінії горизонтальних напружень, що діють на циліндр

Джерело: розроблено авторами

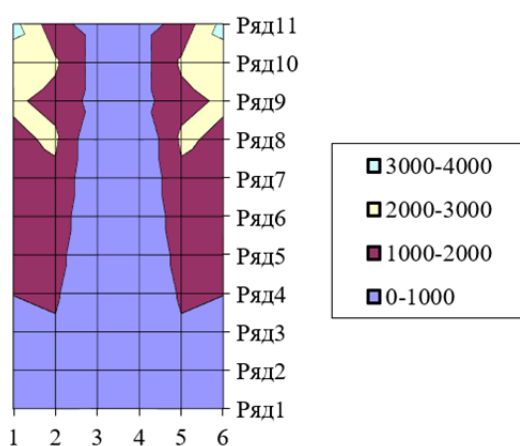


Рисунок 2 – Ізолінії вертикальних напружень, що діють на циліндр

Джерело: розроблено авторами

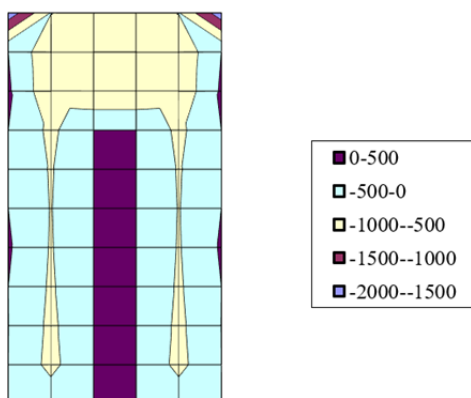


Рисунок 3 – Ізолінії дотичних напружень, що діють на циліндр

Джерело: розроблено авторами

Аналіз розподілу горизонтального компонента напружень усередині циліндра показує, що вони симетричні щодо вертикальної осі (рис.1). У центральній частині спостерігається їхня концентрація до рівня 500МПа, а на деяких ділянках концентрація напружень збільшується до величини 1500-2000МПа.

Аналіз розподілу вертикального компонента напружень усередині циліндра також показує, що вони симетричні щодо вертикальної осі (рис.2). Максимальні напруження знаходяться на верхніх бічних частинах циліндра і мають максимальне значення 3000-4000МПа, а при віддаленні від країв до центру відбувається зниження їхньої концентрації до 1000МПа.

Аналіз розподілу дотичного компонента напружень усередині циліндра, як у випадку з горизонтальним та вертикальним показує, що вони симетричні щодо вертикальної осі (рис.3.). У верхніх кутах спостерігаються критичні напруження, що досягають значення 1500-2000МПа. Також у верхній частині знаходиться значна концентрація напружень 500-1000МПа, які зсуваються у напрямку низу циліндра.

Отже, зображені на рис.1-3 ізолінії дають змогу проаналізувати вплив напружень на циліндр, їх концентрацію і значення. Аналогічно методом граничних елементів можна проаналізувати і поршень. Це дасть більш детальне зображення впливу сил та напружень, що діють у циліндро-поршневій групі, а також можливість розробки нових методів по зменшенню тертя.

Одним із напрямків зміни напружень є конструктивний метод, тобто заміна форми поршня і циліндра з круглої на еліпсоподібну. Але це може призвести до значних затрат і незручностей в розробці цих форм. Слід також розглядати метод зміни напружень за допомогою застосування інших поршневих кілець, тобто іншої їх конфігурації або напilenня, наприклад керамічного. [6]

Висновки. Спираючись на результати даного дослідження вперше показано вплив температурних напружень, що виникають в циліндро-поршневій групі на експлуатацію автомобільного транспорту, також створено методологічні засади подальшого удосконалення роботи двигунів внутрішнього згорання. Розроблена математична модель визначення температури нагріву циліндро-поршневої групи описує вплив на техніко-експлуатаційні показники роботи двигунів внутрішнього згорання.

Вперше показані горизонтальні, вертикальні і дотичні напруження що виникають в циліндро-поршневій групі двигунів внутрішнього згорання. Завдяки розробленій математичній моделі можна також визначити і напруження, що виникають у поршні, поршневому пальці та у поршневих кільцях і таким чином оптимізувати геометричні параметри всіх деталей циліндро-поршневої групи з метою зменшення витрат на тертя у двигуна внутрішнього згорання.

Розглядаючи результати досліджень на основі ізоліній напружень, можна зробити висновок, що двигуни внутрішнього згорання мають резерв потужності шляхом виділення її за допомогою зниження тертя в циліндро-поршневій групі. Але на наш погляд, так як двигуни внутрішнього згорання є основним джерелом викидів шкідливих речовин в атмосферу, то більш раціональним і доцільним буде перехід на електричні або гібридні двигуни, за прикладом закордонних фірм.

Список літератури

1. Бреббія К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методи граничних елементів / пер. з англ. Л. Г. Корнійчука. 1987. 524 с.
2. Головач Н. П., Дияк І. І. Застосування прямого методу граничних елементів для чисельного дослідження деяких прикладних задач. Волинський математичний вісник. 1996. Вип. 2. С. 67-69.

3. Захарчук В. І. Основи теорії та конструкції автомобільних двигунів : навч. посіб. Київ : Каравела, 2022. 232 с.
4. Канарчук В. Є., Лудченко О. А., Чигиринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Київ : Вища школа, 1994.
5. Кисликов В. Ф., Лущик В. В. Будова і експлуатація автомобілів. Київ : Либідь, 2018. 400 с.
6. Крауч С., Старфілд А. Методи граничних елементів в механіці твердого тіла. 1987. 328 с.
7. Волокита А. М., Селіванов В. Л. Основи теорії планування експерименту. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 41 с.
8. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В. та ін. Основи САПР в автомобілебудуванні : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 168 с.
9. Мітрофанов О. С., Проскурін А. Ю. Основи експлуатації, обслуговування та ремонту двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. Харків : Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2018. 152 с.
10. Костюшко І. А., Любашенко Н. Д., Третиник В. В. Методи обчислень : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видво «Політехніка», 2021. 243 с.

References

1. Brebbia, C., Telles, J., & Wrobel, L. (1987). Boundary element methods (L. G. Korniychuk, Trans.).
2. Holovach, N. P., & Diyak, I. I. (1996). Application of the direct boundary element method for numerical study of some applied problems. *Volyn Mathematical Bulletin*, (2), 67–69 [in Ukrainian].
3. Zakharchuk, V. I. (2022). Fundamentals of the theory and design of automobile engines (Educational manual). Kyiv: Karavela [in Ukrainian].
4. Kanarchuk, V. Ye., Ludchenko, O. A., & Chyhyrynets, A. D. (1994). Fundamentals of automobile maintenance and repair (Textbook in 3 vols.). Kyiv: Vyshcha shkola. (599 pp.) [in Ukrainian].
5. Kyslykov, V. F., & Lushchyk, V. V. (2018). Structure and operation of automobiles. Kyiv: Lybid.
6. Crouch, S., & Starfield, A. (1987). Boundary element methods in solid mechanics (Translated from English) [in Ukrainian].
7. Volokyta, A. M., & Selivanov, V. L. (2022). Fundamentals of experimental planning theory: Educational manual for students of the educational program "Computer systems and networks," specialty 123 "Computer engineering" [Electronic resource]. Kyiv: Igor Sikorsky KPI [in Ukrainian].
8. Artiukh, O. M., Dudarenko, O. V., Kuzmin, V. V., et al. (2021). Fundamentals of CAD in automotive engineering: Educational manual. Zaporizhzhia: NU "Zaporizka Politekhnik" [in Ukrainian].
9. Mitrofanov, O. S., & Proskurin, A. Yu. (2018). Fundamentals of operation, maintenance, and repair of internal combustion engines: Kharkiv: NTU "KhPI" Publishing Center [in Ukrainian].
10. Kostyushko, I. A., Liubashenko, N. D., & Tretynik, V. V. (2021). Computational methods: Textbook. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, Politekhnik Publishing House [in Ukrainian].

Serhii Filatov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Vodopianov**
Pedagogical University, Kryvyi Rih, Ukraine

The Influence of Temperature Stresses Arising in the Cylinder-Piston Group During the Operation Of Cars

The research topic is aimed at improving the efficiency and design of motor transport engines and reducing fuel consumption during their operation. The chronological framework of the researched scientific articles is 2020-2024. The authors conducted an analysis of the researched topic with reference to the experience of foreign companies. The article provides a brief description of the functionality of the program for improving the traction qualities of heavy-duty quarry dump trucks. The authors considered and presented graphs of the influence of stresses on the cylinder, their concentration and values using the boundary element method. An analysis of piston stresses depending on its geometric shapes was conducted.

The authors conducted a mathematical study in the field of motor transport based on the boundary element method. Based on the results obtained, it is advisable to use the specified program to increase the efficiency of fuel use in the motor transport sector for the purpose of energy conservation and focusing on reducing the costs of transport enterprises.

boundary contours, boundary elements, field points, stresses, isolines

Одержано (Received) 06.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.073.2:005.334

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.263-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.263-271)

В. В. Аулін¹, проф., д-р техн. наук, **Д. О. Кульова**¹, д-р філос., **В. В. Варваров**², канд. техн. наук
¹Центральнoукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
²Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com, d.coolava@gmail.com, varvarov_@ukr.net

Виявлення, аналіз і прогнозування параметрів ризику безвідмовного навантаження готової продукції на транспортно-логістичному терміналі підприємства

Стаття присвячена аналізу та оцінці ризиків безвідмовного навантаження готової продукції на постах навантаження транспортно-логістичного терміналу підприємства. Визначено закони розподілу щільності ймовірностей безвідмовної роботи буферних ємностей зони зберігання вантажів та величину ризику безвідмовного навантаження враховуючи тип продукції, фракційність, спосіб відвантаження. На основі проведеного ранжування величини ризику безвідмовного навантаження побудовано матрицю ризиків для всієї номенклатури готової продукції у розрізі відповідних зон зберігання та постів навантаження транспортно-логістичного терміналу підприємства.

транспортно-логістичний термінал, зона зберігання, пост навантаження, ризик, логістичний процес, готова продукція підприємства

Постановка проблеми. Транспортно-логістичні термінали відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного функціонування ланцюгів постачання, виконуючи операції: прийому, зберігання, сортування, навантаження, розвантаження, обробки вантажів та їх транспортування. Крім того, вони забезпечують інформаційне та комерційно-правове обслуговування вантажовласників, перевізників і логістичних посередників, включаючи контроль за переміщенням вантажів, управління документальним супроводом перевезень та регулювання договірних відносин відповідно до нормативно-правових вимог.

Під час роботи транспортно-логістичних терміналів виникають різні види ризиків, спричинені внутрішніми і зовнішніми факторами. До основних загроз належать перевантаження складів, недостатня пропускна спроможність пунктів навантаження (ПН), відмови у навантаженні через технічні, організаційні або логістичні збої, а також простої транспортних засобів через невідповідність між обсягами вантажопотоків і можливостями ПН терміналу. Особливу увагу слід приділити ризикам, що виникають у зонах зберігання (ЗЗ) та ПН, оскільки вони безпосередньо впливають на стабільність, ефективність і надійність роботи терміналу.

При цьому важливим завданням є розробка методів виявлення, аналізу та оцінки ризиків у ЗЗ і ПН транспортно-логістичного терміналу підприємства, що дозволить підвищити ефективність його функціонування та мінімізувати наслідки негативних факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі [1-3] транспортно-логістичні термінали розглядаються як важливий елемент інфраструктури. При цьому забезпечується гнучке управління логістичними процесами та їх ефективна організація. Сучасні дослідження зосереджені на підвищенні ефективності роботи таких терміналів шляхом оптимізації логістичних процесів [4], автоматизації операцій [5, 6], інтеграції інформаційних систем та впровадження цифрових технологій [7], зокрема штучного інтелекту [8].

Однак, поряд із цими змінами, транспортно-логістичні термінали залишаються вразливими до різноманітних ризиків [9, 10], що можуть впливати на стабільність та ефективність їх роботи. Зокрема, недостатньо уваги приділяється аналізу ризиків [11], пов'язаних із ЗЗ та ПН. Це суттєво впливає на безперебійну роботу транспортно-логістичних терміналів [12]. Окремим викликом є ризики на етапі відвантаження готової продукції, коли через нестабільність логістичних потоків або обмежену пропускну здатність терміналу можуть виникати відмови у відвантаженні, порушення графіків транспортування та простої транспортних засобів (ТЗ) [13], що веде до матеріальних збитків, порушення договірних зобов'язань між вантажовласниками та перевізниками [14], а також негативно впливає на узгодженість роботи всього ланцюга постачання [15].

Постановка завдання. Метою роботи є виявлення, характеристика та оцінка ризиків, пов'язаних з зонами зберігання та пунктами навантаження транспортно-логістичного терміналу з урахуванням їх впливу на безвідмовність та ефективність логістичних операцій.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Визначити номенклатуру готової продукції підприємства, зон зберігання та способів відвантаження у пунктах навантаження транспортно-логістичного терміналу.
2. На основі статистичного аналізу визначити щільність розподілу ймовірностей безвідмовної роботи буферних ємностей ЗЗ готової продукції підприємства.
3. Теоретично обґрунтувати величину ризику безвідмовного навантаження.
4. Провести оцінку ризику безвідмовного навантаження та його складових.

Виклад основного матеріалу. Виробниче підприємство ПАТ «КІРОВОГРАДГРАНІТ» випускає деяку вихідну сукупність видів готової продукції: $ГП = \{K_i, ФП_i, СП_i\}$, де K_i – виробничі концентрати $ФП_i$ – фракційні піски; $СП_i$ – піски для скляної промисловості; $i = \overline{1,3}$. Підприємство має транспортно-логістичний термінал з постами навантаження $ПН_j, j = \overline{1,13}$.

У транспортно-логістичному терміналі відвантаження готової продукції здійснюється двома способами: $s = 1$ – навалом; $s = 2$ – в м'якому контейнері (МКР).

На території підприємства виділено сукупність ЗЗ готової продукції: $ЗЗ = \{ЗЗ_1, ЗЗ_2, ЗЗ_3, ЗЗ_4, ЗЗ_5, ЗЗ_6\}$, де $ЗЗ_1$ – зона зберігання виробничих концентратів; $ЗЗ_2$ – зона зберігання фракціонованого піску в м'якому контейнері (МКР); $ЗЗ_3$ – зона зберігання навалом фракціонованого піску за допомогою силосу; $ЗЗ_4$ – зона зберігання фракціонованого та скляного піску навалом за допомогою споруди – силосу; $ЗЗ_5$ – зона зберігання скляного піску МКР; $ЗЗ_6$ – зона зберігання вологого піску навалом.

На підприємстві готову продукцію відвантажують у спеціально обладнаних місцях – ПН, виходячи з технологічних властивостей та специфіки виробленої продукції, а також способу відвантаження. Зазначене відображено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вироблена готова продукція, зони зберігання, пости навантаження транспортно-логістичного терміналу та способи відвантаження у ПАТ «КІРОВОГРАДГРАНІТ»

Готова продукція підприємства			Зона зберігання	Пости навантаження транспортно-логістичного терміналу												
Тип	Тара	Фракція		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
К1	МКР	-	ЗЗ ₁	+												
	Навал	-	ЗЗ ₁													+
К2	МКР	-	ЗЗ ₁	+												
К3	МКР	-	ЗЗ ₁	+												

Продовження таблиці 1

Готова продукція підприємства			Зона зберігання	Пости навантаження транспортно-логістичного терміналу												
Тип	Тара	Фракція		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Фракціоновані піски	МКР	(-0,2+0,1 мм)	33 ₂		+											
		(-1,2+0,8 мм)	33 ₂		+											
		(-5,5+1,2 мм)	33 ₂		+											
	Навал (сух.)	(-0,2+0,1 мм)	33 ₃				+									
		(-1,2+0,8 мм)	33 ₃			+										
		(-5,5+1,2 мм)	33 ₃			+										
	Навал (вол.)	(-0,2+0,1 мм)	33 ₆													+
(-1,2+0,8 мм)		33 ₆													+	
ФП		(-5,5+1,2 мм)	33 ₆												+	
Скляні піски ВС-050-1	МКР	(-0,2+0,1 мм)	33 ₅										+	+		
	Навал	(-0,2+0,1 мм)	33 ₄					+	+							
Скляні піски С-070-1	МКР	(-0,2+0,1 мм)	33 ₅										+	+		
	Навал	(-0,2+0,1 мм)	33 ₄							+						
Скляні піски ВС-030-В	МКР	(-0,8+0,2 мм)	33 ₅										+	+		
	Навал	(-0,8+0,2 мм)	33 ₄								+	+				

Джерело: розроблено авторами

Номенклатурою відвантаження в зоні зберігання 33₁ є виробничі концентрати К₁, К₂, К₃. Кожна з номенклатур зберігається в бункері ємністю $V = 15\text{ м}^3$, що має певну продуктивність: $\Pi_{н1}$, $\Pi_{н2}$, $\Pi_{н3}$ (швидкість наповнення). Відвантаження готової продукції може здійснюватися в МКР та/або навалом із бункера з концентратами за допомогою конвеєра. Місце навантаження МКР обладнане кран-балкою 2,0 т. Ділянка відвантаження має критий навіс з ПН, де завантаження в ТЗ здійснюється зверху за допомогою кран-балки або конвеєра. Одночасно може відбуватися завантаження одного автомобіля. Час навантаження 1 МКР в ТЗ розраховується, виходячи з часу роботи кран-балки. Час підвезення МКР навантажувачем не перевищує час роботи кран-балки. Продуктивність пакувальної машини становить 30 т/год.

Показники вантажних робіт для різних 33 та ПН транспортно-логістичного терміналу досліджували методом статистичного аналізу. Визначено (табл. 2) щільність розподілу ймовірностей переповнення 33 та призупинення виробництва продукції через відсутність місця її зберігання, а також простій ТЗ через відсутність готової продукції та невиконання договірних зобов'язань щодо її доставки кінцевому споживачеві для більшості позицій номенклатури виробленої продукції.

Показано, що різні варіанти функціонування ПН на транспортно-логістичному терміналі можна описати в термінах і моделях теорії масового обслуговування [16]. При цьому за основу розв'язання задачі береться розімкнена система з обмеженою довгою чергою. Зазначено, що ТЗ на підприємстві завантажуються у відведеній зоні ПН транспортно-логістичного терміналу з можливістю переходу всередині терміналу в інші ПН в залежності від довжини черги. У такій постановці вхідний потік вважається пуассонівський і згідно вимог навантаження готової продукції описується інтенсивністю I , а його обслуговування відбувається на j – ПН транспортно-логістичного терміналу з інтенсивністю I_j . При цьому тривалість завантаження ТЗ має експоненційний закон розподілу.

Таблиця 2 – Щільність розподілу ймовірностей безвідмовної роботи буферних емностей зони зберігання готової продукції підприємства

Номенклатура готової продукції		Щільність ймовірності	
		Перевантаження зон зберігання і зупинки виробництва, через відсутність місця зберігання готової продукції	Простий транспортних засобів через відсутність готової продукції
Концентратори	K1	$5*1000*normal(x; 760; 1729)$	$5*1000* lognorm(x; 5,8; 1)$
	K2	$8*200* normal(x; 205; 399)$	$8*200* expon(x; 0,0049)$
	K3	$7*10*lognorm(x; 4,7; 0,3)$	$7*10* expon(x; 0,0092)$
Фракціонні піски (ФП)	ФП 1 (-5,0 + 1,2 мм)	$10*500*expon(x; 0,0016)$	$0*500* lognorm(x; 5; 1,63)$
	ФП2 (-1,2 + 0,8 мм)	$13*1000* normal(x; 1083; 2434)$	$13*1000* lognorm(x; 5; 1,75)$
Номенклатура готової продукції		Перевантаження зон зберігання і зупинки виробництва, через відсутність місця зберігання готової продукції	Простий транспортних засобів через відсутність готової продукції
ФП	ФП 3 (-0,2 + 0,1 мм)	$31*5000* normal(x; 7465; 17698)$	$31*5000* lognorm(x; 6; 2)$
Піски для скляної промисловості	СП1 (-0,2 + 0,1 мм)	$4*10000* normal(x; 67352; 37699)$	$4*10000* lognorm(x; 11; 0,6)$
	СП2 (-0,8 + 0,2 мм)	$4*10000* expon(x; 1,5E-5)$	$31*5000* expon(x; 0,0001)$
	СП3 (-0,2 + 0,1 мм)	$13*1000* expon(x; 0,0009)$	$15*1000* expon(x; 0,0013)$

Джерело: розроблено авторами

У такому випадку ймовірність простою транспортно-логістичного терміналу визначатиметься формулою:

$$P_0 = \left[1 + \frac{p^1}{1!} + \frac{p^2}{2!} + \dots + \frac{p^n \frac{p}{n} \left(\frac{p}{n}\right)^{l+1}}{1 - \frac{p}{n}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

де p – наведена інтенсивність потоку ТЗ під завантаження в транспортно-логістичному терміналі, яка характеризує середню кількість ТЗ, що надходять під завантаження за середній час навантаження одного ТЗ.

Ймовірність відмови у завантаженні визначатиметься з розрахунку ймовірності наявності в системі $(n + 1)$ ТЗ, коли будуть зайняті всі ПН терміналу і всі місця в черзі:

$$P_{\text{відм}} = P_{n+l} = P_0 \frac{p^{l+n}}{n!n!}. \quad (2)$$

Відносна q та абсолютна a пропускні спроможності ПН терміналу будуть визначатися через наступні співвідношення:

$$q = 1 - P_{\text{відм}}; a = q\lambda, \quad (3)$$

а середня кількість постів, зайнятих навантаженням у транспортно-логістичному терміналі дорівнює:

$$Z = a/v. \quad (4)$$

Позначивши $\frac{p}{n} = \chi$ можна отримати вираз для середньої кількості ТЗ у черзі під завантаження:

$$\bar{r} = \frac{p^{n+1} p_0}{n-n!} \frac{(l+1)\chi^l + l\chi^{l+1}}{(1-\chi)^2}. \quad (5)$$

Середня кількість ТЗ під завантаження, середній час очікування та середній час процесу завантаження автомобіля оцінюються за виразами :

$$\bar{k} = \bar{r} + z, \bar{t}_{оч} = \bar{r}/\lambda, \bar{t}_{сер} = t_{оч} + t_{обсл}. \quad (6)$$

Безвідмовну роботу ПН розглянемо як подію S_1 з ймовірністю настання $P(r)$. Простій системи вантажних постів терміналу за відсутності ТЗ під завантаження позначимо через подію S_2 , з ймовірністю настання події $P_{відм}$. Зайнятість ТЗ всіх ПН транспортно-логістичного терміналу розглядаємо через подію S_3 , з ймовірністю появи $P_{відм}$. При цьому маємо можливість розрахувати ймовірність безвідмовної роботи системи навантаження готової продукції підприємства (транспортно-логістичного терміналу).

Результуюча сума ймовірності $P_{рез}$ трьох зазначених подій S_1, S_2, S_3 визначатиметься з наступного співвідношення:

$$P_{рез} = P(\sum_{i=1}^3 S_i) = \sum_i P(S_i) - \sum_{i,j} P(S_i S_j) + \sum_{i,j,k} P(S_i S_j S_k). \quad (7)$$

Таким чином, величина ризику безвідмовного навантаження $R_{бн}$ готової продукції на ПН у транспортно-логістичному терміналі визначається співвідношенням:

$$R_{бн} = R_{бє} + R_{прс} + R_{вз}, \quad (8)$$

де $R_{бє}$ – ризик безвідмовної роботи буферної ємності ПН готової продукції терміналу підприємства ($R_{бє} = R_{пс} + R_{птз}$, де ризик переповнення складу $R_{пс}$ через відсутність місця зберігання; ризик простою ТЗ $R_{птз}$ через відсутність готової продукції); $R_{прс}$ – ризик простою системи ПН терміналу за відсутності ТЗ під завантаження; $R_{вз}$ – ризик відмови у завантаженні (зайнятість ТЗ всіх ПН терміналу).

Величина ризику безвідмовного навантаження готової продукції на ПН транспортно-логістичного терміналу підприємства визначається наступними складовими:

$$R_{бн} = R_{пс} + R_{птз} + R_{прс} + R_{вз}. \quad (9)$$

Кожна із зазначених складових ризику є математичним очікуванням відповідної шкоди для певної ЗЗ та ПН готової продукції терміналу підприємства (таблиця 3, рисунок 1-3).

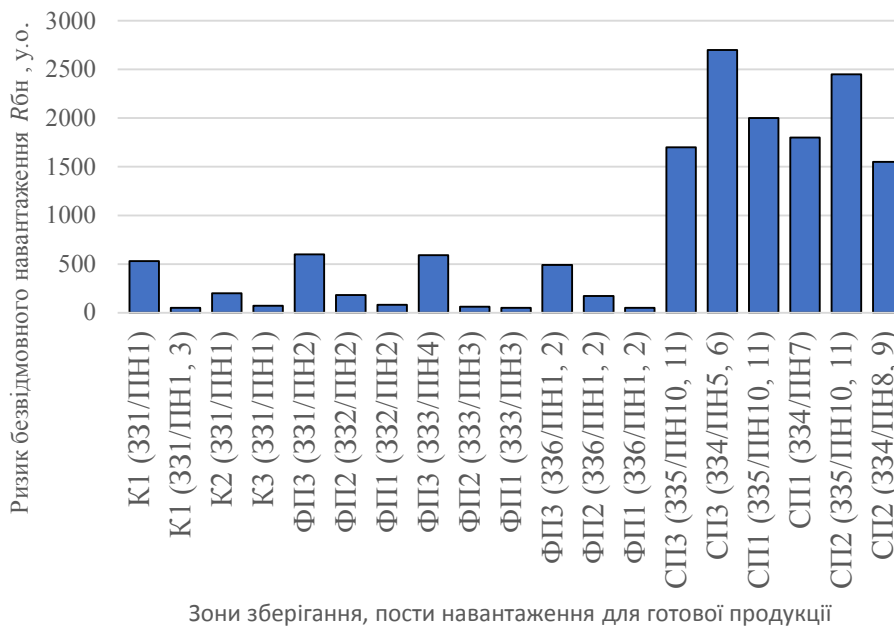
Таблиця 3 – Оцінка величини ризику безвідмовного навантаження готової продукції на постах навантаження транспортно-логістичного терміналу підприємства

Продукція			Зона зберігання/ ПН	Ризик безвідмовної роботи буферної ємності ПН $R_{бє}$ у.о.		Ризик простою системи ПН $R_{прс}$, у.о.	Ризик відмови в завантаженні $R_{вз}$, у.о.	Ризик безвідмовного навантаження готової продукції $R_{бн}$, у.о.
Тип	Тара	Фракція		$R_{пс}$	$R_{птз}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
К1	МКР	-	ЗЗ ₁ /ПН ₁	313,6	262,4	44,8	19,2	640,0
	Навал		ЗЗ ₁ /ПН _{1,3}	7,1	4,8	11,2	10,9	34,0
К2	МКР	-	ЗЗ ₁ /ПН ₁	163,5	11,0	33,1	13,3	220,9
К3	МКР	-	ЗЗ ₁ /ПН ₁	34,0	4,9	12,2	9,7	60,8
ФП	МКР	(-0,2+0,1 мм)	ЗЗ ₂ /ПН ₂	234,0	222,0	54,0	90,0	600,0

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фракціоновані піски	МКР	(-1,2+0,8 мм)	332/ПН2	68,3	28,0	33,3	45,5	175,0
		(-5,0+1,2 мм)	332/ПН2	25,2	16,1	19,6	9,1	70,0
	Навал (сух.)	(-0,2+0,1 мм)	333/ПН4	258,0	108,0	132,0	102,0	600,0
		(-1,2+0,8 мм)	333/ПН3	22,4	2,8	4,4	10,4	40,0
		(-5,0+1,2 мм)	333/ПН3	7,5	6,9	6,3	9,3	30,0
	Навал (вол.)	(-0,2+0,1 мм)	336/ПН1,2	239,7	24,0	52,7	163,0	479,4
		(-1,2+0,8 мм)	336/ПН1,2	87,3	46,3	37,4	7,1	178,1
(-5,0+1,2 мм)		336/ПН1,2	3,7	15,7	12,4	9,5	41,4	
Скляні піски ВС-050-1	МКР	(-0,2+0,1 мм)	335/ПН10,11	840,0	218,4	117,6	504,0	1680,0
	Навал	(-0,2+0,1 мм)	334/ПН5,6	886,0	590,6	214,8	993,4	2684,8
Скляні піски С-070-1	МКР	(-0,2+0,1 мм)	335/ПН10,11	944,5	401,9	120,6	542,6	2009,6
	Навал	(-0,2+0,1 мм)	334/ПН7	1171,8	226,8	226,8	264,6	1890,0
Скляні піски ВС030-В-	МКР	(-0,8+0,2 мм)	335/ПН10,11	813,1	961,0	394,2	295,7	2464,0
	Навал	(-0,8+0,2 мм)	334/ПН8,9	281,3	625,2	31,3	625,2	1563,0

Джерело: розроблено авторами



Зони зберігання, пости навантаження для готової продукції

Рисунок 1 – Ризики безвідмовного навантаження для відповідних зон зберігання та постів навантаження готової продукції у транспортно-логістичному терміналі підприємства ПАТ «КІРОВОГРАДГРАНІТ»

Джерело: розроблено авторами

На підставі оцінок ймовірностей виникнення ризиків та рівня впливу (в об'ємному та вартісному еквіваленті) на процеси вантажних робіт була побудована матриця ризиків безвідмовного навантаження для всієї номенклатури виробленої продукції у розрізі відповідних ЗЗ та ПН транспортно-логістичного терміналу підприємства (рис. 3).

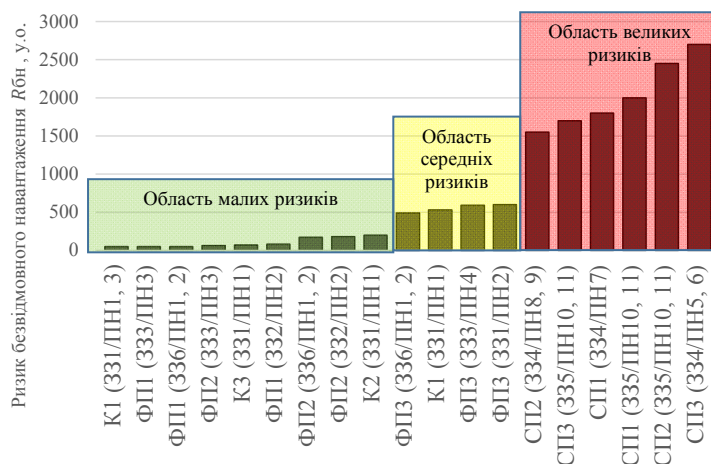


Рисунок 2 – Ранжований ряд ризиків безвідмовного навантаження для відповідних зон зберігання та постів навантаження готової продукції у транспортно-логістичному терміналі підприємства ПАТ «КІРОВОГРАДГРАНІТ»

Джерело: розроблено авторами

[80; 100]			(СП ₂) 33 ₄ /ПН _{8,9}		(СП ₃) 33 ₄ /ПН _{5,6} (СП ₂) 33 ₅ /ПН _{10,11}
[60;80]		(ФП ₃) 33 ₁ /ПН ₂	(К ₁) 33 ₁ /ПН ₁	(СП ₁) 33 ₅ /ПН _{10,11}	(СП ₁) 33 ₄ /ПН ₇ (СП ₃) 33 ₅ /ПН _{10,11}
[40;60]	(ФП ₂) 33 ₂ /ПН ₂ (ФП ₂) 33 ₃ /ПН ₃	(К ₃) 33 ₁ /ПН ₁		(ФП ₃) 33 ₃ /ПН ₄	
[20;40]	(ФП ₂) 33 ₆ /ПН _{1,2}	(ФП ₁) 33 ₂ /ПН ₂ (ФП ₁) 33 ₆ /ПН _{1,2}	(ФП ₃) 33 ₆ /ПН _{1,2}		
[0;20]		(ФП ₁) 33 ₃ /ПН ₃ (К ₁) 33 ₁ /ПН _{1,3}	(К ₂) 33 ₁ /ПН ₁		
Вплив Ймовірність	[0;20]	[20;40]	[40;60]	[60;80]	[80; 100]

Рисунок 3 – Матриця ризиків безвідмовного навантаження для відповідних зон зберігання та постів навантаження готової продукції у транспортно-логістичному терміналі підприємства ПАТ «КІРОВОГРАДГРАНІТ»

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, в результаті проведених досліджень техніко-технологічних показників зон зберігання та пунктів навантаження готової продукції транспортно-логістичного терміналу підприємства методом найменших квадратів були визначені для кожної зони взаємозв'язку часу завантаження одного ТЗ від швидкості завантаження, що дозволили реалізувати на постах навантаження ефективно та неефективно завантаження продукції у ТЗ.

Висновки.

1. Визначено номенклатуру готової продукції підприємства, з відповідними зонами зберігання, відвантаження якої здійснюється навалом і в м'якому контейнері у пунктах навантаження. Враховано технологічні властивості та специфіку даних

вантажів, а також способи відвантаження з метою ефективної роботи транспортно-логістичного терміналу.

2. На основі статистичного аналізу бази даних визначено закони розподілу щільності ймовірностей безвідмовної роботи буферних ємностей зони зберігання готової продукції підприємства.

3. Дано теоретичне обґрунтування ризику безвідмовного навантаження та його складових, використовуючи теорію масового обслуговування, а саме: $R_{\delta c}$ – ризик безвідмовної роботи буферної ємності пункту навантаження готової продукції терміналу підприємства; R_{nc} – ризик переповнення складу через відсутність місця зберігання; R_{ntz} – ризик простою транспортного засобу через відсутність готової продукції; R_{npc} – ризик простою системи поста навантаження терміналу за відсутності транспортного засобу під завантаження; R_{ez} – ризик відмови у завантаженні (зайнятість транспортних засобів всіх постів навантаження терміналу).

4. Визначено величину ризику безвідмовного навантаження готової продукції на постах навантаження транспортно-логістичного терміналу підприємства, враховуючи тип продукції, фракційність, спосіб відвантаження, різні зони зберігання і пости навантаження.

5. Проведено ранжування величини ризику безвідмовного навантаження для відповідних зон зберігання та постів навантаження готової продукції у транспортно-логістичному терміналі з визначенням областей малих, середніх та великих ризиків.

6. Побудовано матрицю ризиків безвідмовного навантаження для всієї номенклатури виробленої продукції у розрізі відповідних зон зберігання та постів навантаження транспортно-логістичного терміналу підприємства.

Список літератури

1. Цимбал С. В. Мельник Р. В. Логістика терміналів (терміналістика) як один з перспективних напрямів розвитку логістики. *Вісник ВПІ*. 2024. Вип. 5 (176). С. 84–91. DOI: 10.31649/1997-9266-2024-176-5-84-91.
2. Харченко М.В. Транспортно-логістична інфраструктура та її місце в соціально-економічній системі підприємств України. *Економічний простір*. 2020. № 153. С. 83-88. DOI: 10.32782/2224-6282/153-15.
3. Решетнікова О. В., Даниленко В. І., Боровик Т. В. Роль логістичного менеджменту та маркетингу у сфері надання логістичних послуг. *Економічний простір*. 2020. Вип. 156. С. 151-154. DOI: 10.32782/2224-6282/156-27.
4. Пасічник А.М. Алгоритм побудови та оптимізації регіональної мережі транспортно-логістичних комплексів. *Математичне моделювання*. 2023. № 2(49). С. 156-164. DOI: 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293184.
5. Савицький Е.Е. Вплив оптимізації логістичних процесів на ефективність комерційної діяльності підприємства. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 52. С. 125-131. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-52-47.
6. Аулін В.В., Тищенко С.Ю., Гриньків А.В. Інноваційні рішення в складській логістиці. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. I. 2024. С. 270-285.
7. Головіна О. Сучасні технології в управлінні транспортною логістикою. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. 2023. Vol. 2, No. 3. P. 35-42. doi: 10.46299/j.isjmfef.202302023.04
8. Albrecht T., Baier M.-S., Gimpel H., Meierhöfer S., Röglinger M., Schlüchtermann J., Will L. Leveraging Digital Technologies in Logistics 4.0: Insights on Affordances from Intralogistics Processes. *Information Systems Frontiers*. 2024. Volume 26. P. 755–774. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-023-10394-6>
9. Singhal P., Agarwal G., Mittal M. L. Supply Chain Risk Management: Review, Classification and Future Research Directions. *Int. Journal of Business Science and Applied Management*. 2011. Volume 6, Issue 3. P. 14-42.
10. Аулін В.В., Кульова Д.О., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. II, С. 205-213. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213.
11. Кульова Д.О. Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на транспорті. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. I. С. 261-269. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269.
12. 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.
13. Янчук М. Б., Пронь С. В., Федина В. П., Чередніченко К. В. Науково-методичні підходи до управління транспортними ризиками мультимодальних вантажних перевезень. *БізнесІнформ*. 2021. №2. С. 200-209.
14. Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія / за заг. ред. Д.В. Ломотька. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М. 2022. Т2. 216 с.
15. Лыченко Н.Б. Логістичні стратегії в торгівлі : монографія. К. : Київ. нац. торг. екон. ун-т. 2016. 432 с.
16. Zhenyu G. Queuing Theory in Modern Technology, Areas Covered, and Challenges. *Highlights in Science*,

Engineering and Technology. 2024. Volume 120. P. 26-34.

References

1. Tsymbal, S. V., & Melnyk, R. V. (2024). Logistics of terminals (terminalistics) as one of the promising directions of logistics development. *Visnyk VPI*, 5(176), 84–91. 10.31649/1997-9266-2024-176-5-84-91. [in Ukrainian].
2. Kharchenko, M. V. (2020). Transport and logistics infrastructure and its place in the socio-economic system of enterprises in Ukraine. *Economic Space*, 153, 83–88. doi.org/10.32782/2224-6282/153-15. [in Ukrainian].
3. Reshetnikova, O. V., Danylenko, V. I., & Borovyk, T. V. (2020). The role of logistics management and marketing in the provision of logistics services. *Economic Space*, 156, 151–154. 10.32782/2224-6282/156-27. [in Ukrainian].
4. Pasichnyk, A. M. (2023). Algorithm for building and optimizing the regional network of transport and logistics complexes. *Mathematical Modeling*, 2(49), 156–164. 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293184. [in Ukrainian].
5. Savytskyi, E. E. (2023). The impact of optimizing logistics processes on the efficiency of a company's commercial activities. *Economy and Society*, 52, 125–131. 10.32782/2524-0072/2023-52-47. [in Ukrainian].
6. Aulin, V. V., Tyshchenko, S. Yu., & Hrynkyv, A. V. (2024). Innovative solutions in warehouse logistics. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41), Part I, 270–285. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.270-285. [in Ukrainian].
7. Holovina, O. (2023). Modern technologies in transport logistics management. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*, 2(3), 35–42. 10.46299/j.isjmef.202302023.04. [in Ukrainian].
8. Albrecht, T., Baier, M.-S., Gimpel, H., Meierhöfer, S., Röglinger, M., Schlüchtermann, J., & Will, L. (2024). Leveraging digital technologies in logistics 4.0: Insights on affordances from intralogistics processes. *Information Systems Frontiers*, 26, 755–774. https://doi.org/10.1007/s10796-023-10394-6.
9. Singhal, P., Agarwal, G., & Mittal, M. L. (2011). Supply chain risk management: Review, classification and future research directions. *International Journal of Business Science and Applied Management*, 6(3), 14–42.
10. Aulin, V. V., Kulova, D. O., Hrynkyv, A. V., & Lysenko, S. V. (2024). Risk assessment of unsecured transportation of petroleum products by road. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41), Part II, 205–213. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213. [in Ukrainian].
11. Kulova, D. O. (2024). Application of the conceptual risk management approach in the field of transport safety. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41), Part I, 261–269. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269. [in Ukrainian].
12. Aulin, V. V. (Ed.). (2021). *Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems*. Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V. F. [in Ukrainian].
13. Yanchuk, M. B., Pron, S. V., Fedyna, V. P., & Cherednichenko, K. V. (2021). Scientific and methodological approaches to transport risk management in multimodal freight transport. *Business Inform*, 2, 200–209. [in Ukrainian].
14. Lomotko, D. V. (Ed.). (2022). *Scientific and technical research in the field of transport (Vol. 2)*. Ivano-Frankivsk: Academy of Technical Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].
15. Ilchenko, N. B. (2016). *Logistics strategies in trade*. Kyiv: KNU of Trade and Economics. [in Ukrainian].
16. Zhenyu, G. (2024). Queuing theory in modern technology, areas covered, and challenges. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 120, 26–34.

Viktor Aulin¹, Prof., Dr. tech. sci., **Daria Kulova**¹, Ph.D tech. sci., **Valerii Varvarov**², PhD tech. sci.

¹*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

²*Kharkiv National Ivan Kozhedub Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

Identification, Analysis, and Forecasting of Failure-Free Loading Risk Parameters for Finished Products at a Transport and Logistics Terminal

The study is focused on summarizing and analyzing the results obtained in the assessment of failure-free loading risks of finished products at the loading points of a transport and logistics terminal. The nomenclature of finished products and their corresponding storage zones was identified, considering the technological properties and specific characteristics of these cargoes to enhance the efficiency of terminal operations.

The research established probability density distribution laws for the reliable operation of buffer storage tanks based on statistical analysis. A theoretical justification for failure-free loading risks and their components was developed using queuing theory. The main risks identified include the failure-free operation risk of buffer storage tanks, warehouse overflow due to the lack of storage space, vehicle downtime due to product unavailability, loading post system downtime due to the absence of a vehicle, and refusal to load due to full capacity at all terminal loading points.

To quantify failure-free loading risks, factors such as product type, fractionality, loading method, and storage zones were considered. A ranking of risk levels was conducted, classifying loading risks into low, medium, and high categories. Based on these findings, a risk matrix was developed for the entire range of finished products, segmented by storage zones and loading points within the transport and logistics terminal. The study provides a systematic approach to assessing and classifying failure-free loading risks, allowing for the identification of critical areas that require optimization. The developed risk matrix enables effective decision-making for optimizing loading processes, reducing downtime, and enhancing the stability of logistics operations.

transport and logistics terminal, storage zone, loading post, risk, logistics process, finished products of the enterprise

Одержано (Received) 14.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025

І. А. Бережнюк, Є. Б. Сліпенький, В. О. Дорошук, В. С. Сорока, доц., канд. с.-г. наук
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
e-mail: berezhniak_m21@nuwm.edu.ua, e.b.slipenkyi@nuwm.edu.ua,
v.o.doroshchuk@nuwm.edu.ua, v.s.soroka@nuwm.edu.ua

Підвищення ефективності складських процесів шляхом моделювання сервісного центру

У статті розглянуто питання підвищення ефективності складських процесів шляхом моделювання сервісного центру. Визначено основні проблеми, що виникають у роботі складів, та запропоновано шляхи їх вирішення за допомогою моделювання. Вирішення проблем потребує впровадження сучасних технологій управління складськими процесами, таких як цифрове моделювання, автоматизація та використання штучного інтелекту для прогнозування навантажень. Оптимізація логістичних процесів за допомогою програмного забезпечення, такого як FlexSim, дозволяє мінімізувати простой, збалансувати навантаження на персонал, покращити використання складських площ і зменшити кількість помилок у комплектації, що загалом підвищує ефективність роботи складу.

ефективність, складські процеси, сервісний центр, моделювання, оптимізація, FlexSim, персонал, обслуговування

Постановка проблеми. У роботі сучасних складів часто зустрічаються проблеми, пов'язані з неефективною організацією складських процесів. Це може проявлятися у затримках приймання та відвантаження товарів, нераціональному використанні площі складу. Вирішення цих проблем є критично важливим для успішної діяльності будь-якого підприємства, що має справу з обробкою та зберіганням товарів. Неефективні складські процеси призводять до збільшення витрат, зниження якості обслуговування клієнтів та втрати конкурентних переваг. Комплексний підхід до вирішення цих проблем включає вдосконалення організаційних процесів, використання сучасних технологій та обладнання, дозволить оптимізувати роботу складу, знизити витрати, підвищити якість обслуговування клієнтів та забезпечити конкурентоспроможність підприємства на ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності складських процесів є ключовим аспектом для багатьох підприємств, оскільки оптимізація цих процесів безпосередньо впливає на загальну продуктивність та конкурентоспроможність компанії. Одним із сучасних підходів до досягнення цієї мети є моделювання сервісного центру, що дозволяє детально аналізувати та вдосконалювати логістичні операції. Моделювання складських процесів у своїх працях досліджували К. Колесник, М. Хуснутдінов, Р. Трохимчук, І. Артишук, С. І. Гриценко, С. В. Смерічевська, Л. В. Савченко. Ці роботи роблять вагомий внесок у розвиток теорії та практики моделювання складських процесів, сприяючи підвищенню ефективності логістичних операцій.

У дослідженні Парія Л.В., Виноградчого В.І. та Перерви Т.П. (2023) розглядаються заходи щодо підвищення ефективності управління логістичною системою на підприємствах-експортерах. Автори підкреслюють важливість комплексного підходу до управління матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками, що сприяє оптимізації складських операцій та покращенню взаємодії між різними підрозділами підприємства [5].

У наукових дослідженнях акцентується увага на вдосконаленні логістичного менеджменту операційних процесів, зокрема складської логістики.

В.Є. Марчук детально розглядає теоретичні основи та практичні рекомендації щодо управління складським господарством підприємства. Особлива увага приділяється організації та автоматизації технологічних процесів на складі, що є невід'ємною частиною моделювання сервісного центру для підвищення ефективності логістичних операцій [6].

Постановка завдання. В умовах жорсткої конкуренції на сучасному ринку українські компанії прагнуть підвищити якість обслуговування клієнтів та мінімізувати можливі ризики. У зв'язку з цим, питання ефективного складського менеджменту набуває особливої актуальності та стає важливим напрямом наукових досліджень. Для оптимізації складських операцій та підвищення їх швидкості на українському ринку розробляються спеціалізовані програмні продукти. Автоматизація логістичної системи є запорукою успішної роботи з великими обсягами даних, що є необхідним для сучасного бізнесу. Одним із шляхів вирішення цих проблем є моделювання складських процесів, яке дозволяє оцінити ефективність роботи складу, виявити "вузькі місця" та розробити шляхи оптимізації. Особливу увагу слід приділити моделюванню сервісного центру, як одному з ключових елементів складської системи.

Забезпечення ефективного зберігання, швидкого сортування, обробки товарів та обслуговування замовників є складним завданням, що потребує комплексного підходу. Метою дослідження є оптимізація сервісного центру, який забезпечить швидке, якісне та персоналізоване обслуговування, що сприятиме підвищенню задоволеності споживачів. Система FlexSim є ефективним інструментом для вирішення цієї задачі та забезпечення високого рівня обслуговування клієнтів.

Виклад основного матеріалу. Сучасні складські комплекси відіграють важливу роль у логістичній системі підприємства. Ефективна робота складу забезпечує своєчасне та якісне обслуговування клієнтів, зниження витрат та підвищення конкурентоспроможності підприємства. Проте, на практиці часто виникають проблеми, пов'язані з неефективною організацією складських процесів, недостатнім використанням сучасних технологій та обладнання, а також низькою кваліфікацією персоналу.

Попри впровадження сучасних технологій та автоматизацію, складські комплекси продовжують стикатися з низкою проблем, які негативно впливають на ефективність їхньої роботи.

Однією з ключових проблем є тривалі простой в обробці замовлень, що виникають через неузгодженість процесів, відсутність чіткої маршрутизації товарів та неефективне використання обладнання. Часто це спричиняється недостатньою пропускнуною спроможністю конвеєрних систем, незбалансованим розподілом навантаження між зонами або нестачею кваліфікованого персоналу в пікові години.

Перевантаженість персоналу є ще одним фактором, який впливає на загальну продуктивність складу. Часто це трапляється через нерівномірний розподіл робочих завдань, недостатню автоматизацію рутинних операцій або складність навігації по складу. В результаті працівники витрачають більше часу на пошук, сортування та комплектацію товарів, що призводить до зниження швидкості виконання замовлень і підвищеного рівня втоми персоналу.

Не менш серйозною проблемою є неефективне використання складських площ. Багато складів стикаються з ситуацією, коли товар розміщений хаотично або не оптимізовано за частотою обігу. Це призводить до збільшення часу, необхідного для пошуку та комплектації товарів, а також зниження місткості складу. Відсутність правильної стратегії зберігання, наприклад, застосування ABC-аналізу, може спричинити затримки та надмірні витрати на логістичні операції. Раціональна

організація місць зберігання дозволяє скоротити час на пошук та відбір продукції. Оптимізація складських площ є важливим фактором, що впливає на продуктивність роботи складу, зокрема застосування стелажних систем високого зберігання, автоматизованих конвеєрів та роботизованих комплексів.

Ще однією поширеною проблемою є високий рівень помилок у комплектації замовлень. Помилки можуть виникати через людський фактор, неправильне маркування товарів або відсутність належного контролю на кожному етапі обробки замовлення. Це не лише впливає на репутацію компанії, але й збільшує витрати на обробку повернень та коригування замовлень. Використання сучасних технологій, таких як голосове управління, сканери штрих-кодів або роботизовані комплектаційні станції, дозволяє суттєво знизити рівень помилок і прискорити роботу.

Крім того, багато підприємств стикаються з довгими чергами у зонах відвантаження, що може бути спричинено недостатньою пропускнуою спроможністю, неефективним плануванням завантаження транспорту або затримками в обробці документів. Нерідко це призводить до порушення строків доставки, штрафних санкцій та невдоволення клієнтів.

Крім основних процесів, склади також виконують допоміжні операції, такі як повернення товарів, управління запасами, перерозподіл продукції між різними складами, обслуговування обладнання та контроль залишків. Оптимізація всіх цих етапів за допомогою сучасних технологій та програмного забезпечення дозволяє значно підвищити ефективність роботи складу, мінімізувати витрати та покращити якість обслуговування клієнтів.

Зміни на ринку та посилення конкуренції постійно впливають на зовнішнє середовище, в якому функціонують логістичні системи. Щоб логістична стратегія відповідала цим змінам, кожна компанія потребує ефективної методології. Систематичне планування та проектування логістичних систем є запорукою успіху, адже дозволяє враховувати можливі варіанти розвитку подій та адаптуватися до них. Гнучкість та здатність передбачати майбутнє є критично важливими для сучасного бізнесу. Саме тому компанії, які мають чіткий план дій та здатні швидко реагувати на зміни, отримують значну конкурентну перевагу. Вміння бачити альтернативи та обирати оптимальні рішення забезпечує стабільність та розвиток бізнесу в умовах постійних змін.

На етапі підготовки до проекту необхідно обґрунтувати доцільність створення сервісного центру або проаналізувати проблеми розвитку вже існуючого. План впровадження сервісного центру або модернізації його роботи оформлюється у вигляді документу, де чітко прописані цілі, шляхи досягнення, джерела фінансування, детальний опис об'єкта та економічна ефективність запланованих заходів. Цей документ служить основою для прийняття рішень та реалізації проекту.

Традиційні методи управління складськими процесами часто мають низку недоліків, зокрема низьку продуктивність, втрати часу через нераціональне розташування товарів та недостатню автоматизацію. Одним із найефективніших рішень для вдосконалення складської логістики є використання програмного моделювання.

Потужним інструментом у цій сфері є FlexSim – програмне забезпечення для моделювання складських, виробничих та логістичних процесів у 3D-середовищі. Використання FlexSim дозволяє виявити вузькі місця, протестувати різні сценарії оптимізації та впровадити ефективні рішення без ризику для реального бізнесу.

Програмне забезпечення FlexSim, розроблене компанією FlexSim Software Products, надає можливість створення імітаційних моделей та проведення аналізу результатів моделювання в процесі його виконання [9].

Сучасні застосунки для моделювання дозволяють точно відтворювати середовище як у вигляді візуалізації фізичних елементів, так і через приховану, часто

складну логічну структуру. Використання обох аспектів моделювання значно підвищує його ефективність у здобутті визнання та розв'язанні проблем. FlexSim має ряд переваг через його зручність у використанні, а також широкі візуальні та логічні можливості, що дозволяють користувачам зосередитися на концепціях і методах моделювання [10].

FlexSim – це сучасне програмне забезпечення для моделювання та аналізу складських процесів, яке дозволяє створювати 3D-моделі логістичних комплексів, оцінювати їхню ефективність, прогнозувати наслідки змін та знаходити оптимальні рішення для покращення продуктивності. Програма широко використовується у складській логістиці, виробництві та дистрибуції, оскільки дозволяє проводити детальний аналіз роботи складів без ризику для реальних операцій.

Однією з ключових переваг FlexSim є гнучкість у налаштуванні процесів. Користувачі можуть створювати різні сценарії роботи складу, змінювати параметри логістичних потоків, тестувати вплив нових стратегій управління запасами та моделювати поведінку персоналу. Це дає змогу оцінити ефективність процесів і впровадити оптимальні рішення для підвищення продуктивності.

Ще одна важлива особливість програми – 3D-візуалізація складських операцій, яка дозволяє наочно побачити, як працює склад у режимі реального часу. Завдяки цьому менеджери можуть легко виявити вузькі місця, такі як затримки у процесі приймання товарів, перевантажені зони зберігання чи неефективний розподіл персоналу.

Програма дозволяє отримувати детальні звіти про продуктивність складу, аналізувати швидкість обробки замовлень, час виконання операцій, рівень завантаженості ресурсів та інші важливі показники. Це дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення на основі точних даних.

Окрім того, FlexSim надає можливість тестування альтернативних рішень без необхідності впровадження змін у реальні процеси. Наприклад, можна змоделювати, як зміниться швидкість обробки замовлень при збільшенні кількості працівників або впровадженні автоматизованих сортувальних систем. Це дає змогу уникнути ризику та фінансові витрати, пов'язані із невдалими рішеннями.

Додатково FlexSim підтримує інтеграцію з іншими програмними системами управління складом (WMS), що дозволяє моделювати процеси на основі реальних даних. Використання такого підходу допомагає компаніям зменшити витрати, скоротити час виконання замовлень, підвищити точність комплектації та покращити загальну ефективність складських операцій.

На початковому етапі створення 3D-моделі необхідно розробити базовий макет бізнес-системи, яку планується моделювати. Розглянемо приклад центру обслуговування клієнтів, де працює один або кілька представників служби підтримки. Зазвичай клієнти, які приходять до центру, займають чергу біля вікна, де їх обслуговують співробітники. У процесі моделювання також враховується можливість того, що клієнти можуть покинути чергу, якщо час очікування занадто довгий.

Для моделювання всіх цих елементів до 3D-моделі необхідно додати об'єкти. Саме вони є основою для побудови 3D-симуляції. Кожен тип об'єкта має своє призначення та функції. Деякі з об'єктів зустрічаються найчастіше:

"Flow items" – об'єкти, що рухаються по 3D-моделі, зазвичай від однієї станції до іншої, вони символізують клієнтів, які звертаються до центру обслуговування.

"Fixed resources" – нерухомі об'єкти в 3D-моделі, які взаємодіють з "flow items" (елементами потоку) і виконують свою функцію, в даній моделі обслуговування клієнтів.

"Task executers" – рухомі об'єкти в 3D-моделі, що відповідають за виконання різноманітних завдань, включаючи транспортування елементів потоку та управління обладнанням.

При моделюванні сервісного центру запуск імітаційної моделі на початкових етапах її розробки є необхідним для верифікації та валідації моделі, що дозволяє виявити та усунути потенційні помилки та забезпечити її коректну побудову.

Для створення більш складніших потоків між фіксованими ресурсами моделі використовується інструмент під назвою "глобальні списки". У цій моделі елементи потоку представлятимуть клієнтів. Коли клієнти стають у чергу, їх буде додано до списку клієнтів, що очікують, у якому відстежуватиметься, як довго клієнти чекали. Служба обслуговування першими допоможе клієнтам, які чекали найдовше. Однак клієнти, які чекали більше 200 секунд, будуть розчаровані та підуть через Unhappy Customers sink. Щоб створити цю функціональність необхідно застосувати "глобальний список", який може фільтрувати та визначати пріоритети елементів потоку за допомогою складних наборів критеріїв.

Необхідно відредагувати властивості 3D об'єктів, щоб створити базу логіку імітаційної моделі, змінити швидкість прибуття для клієнтів, щоб клієнт приходив приблизно щохвилини, установити кількість часу, який потрібно працівнику, щоб допомогти клієнту. Для цього використовуватиметься статистичний розподіл який називається експоненціальним розподілом.

Щоб досягнути мети підвищення ефективності та рівня задоволеності клієнтів у центрі обслуговування, імітаційна модель повинна надавати детальну інформацію, яка допоможе відповісти на ключові питання: як змінюється довжина черги протягом симуляції, які фактори найбільше впливають на її зростання чи зменшення, де знаходяться "вузькі місця", де черга накопичується найбільше, скільки часу клієнти проводять в черзі в середньому, яка максимальна та мінімальна тривалість очікування, чи є значні відхилення від середнього часу, яка частка клієнтів залишається задоволеною обслуговуванням, а яка – ні (рис.1).

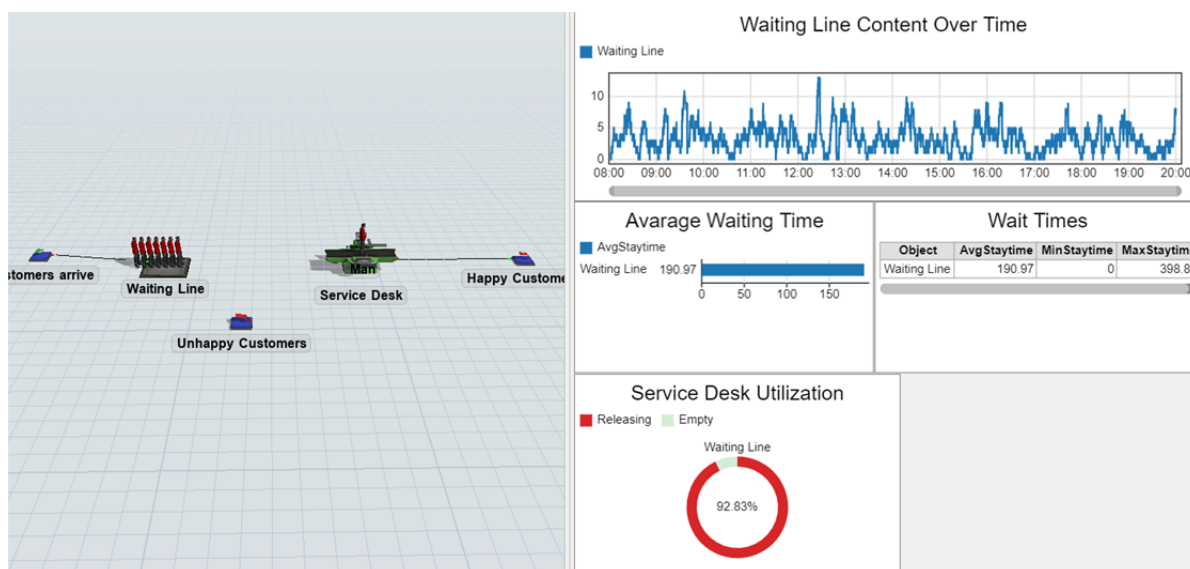


Рисунок 1 – Імітаційна модель сервісного центру обслуговування клієнтів

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 1 демонструє початкову модель сервісного центру, де клієнти прибувають, стають у чергу та очікують обслуговування на одному сервісному пункті. На зображенні видно, що утворюється черга, а також є окрема категорія незадоволених клієнтів. Графіки показують значні коливання у заповненості черги протягом дня, високий середній час очікування (190.97 секунд) і значну завантаженість сервісного

столю (92.83%). Це свідчить про перевантаженість системи та неефективність поточного процесу обслуговування.

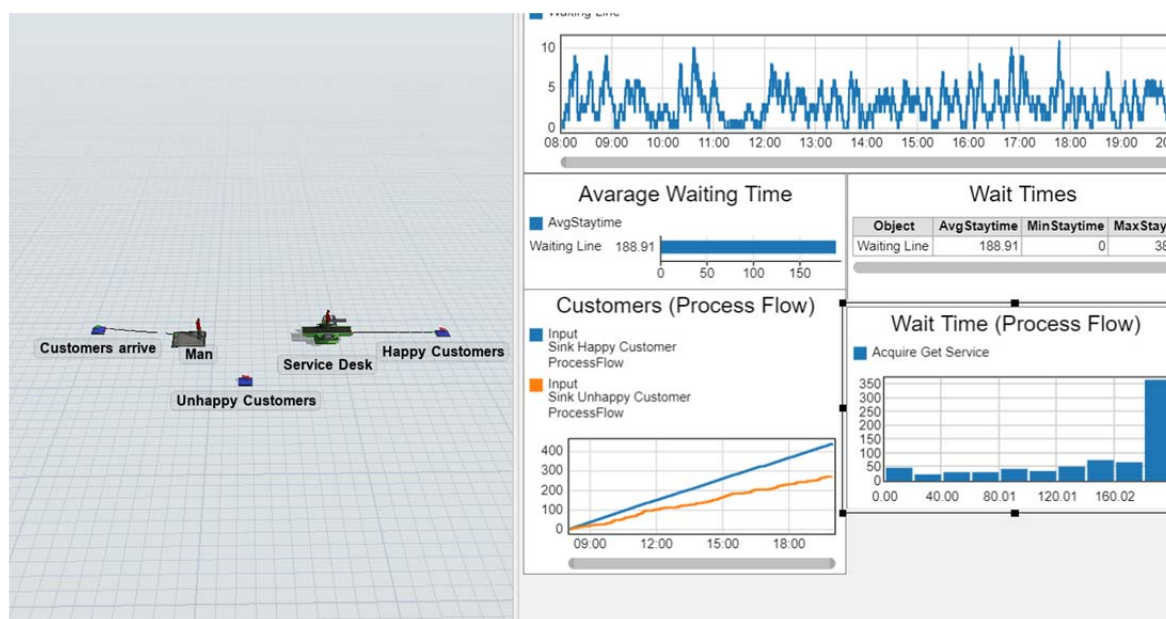


Рисунок 2 – Графіки імітаційної моделі сервісного центру обслуговування клієнтів
Джерело: розроблено авторами

З рисунку 2 видно, що після покращення роботи сервісного центру час очікування все ще залишається високим (188.91 секунд). На графіках також помітно зменшення кількості клієнтів у черзі, що свідчить про покращення процесу обслуговування, але кількість задоволених клієнтів трохи більше ніж незадоволених, що свідчить про необхідність покращення бізнес-процесу.

Після застосування додаткової служби підтримки загальна статистика бізнес-системи показуватиме позитивні зміни, імітаційна модель набуде іншого вигляду (рис.3). Додаткові аналітичні панелі відображають динаміку клієнтських потоків та показують збільшення кількості "щасливих клієнтів", що є важливим показником підвищення ефективності роботи.

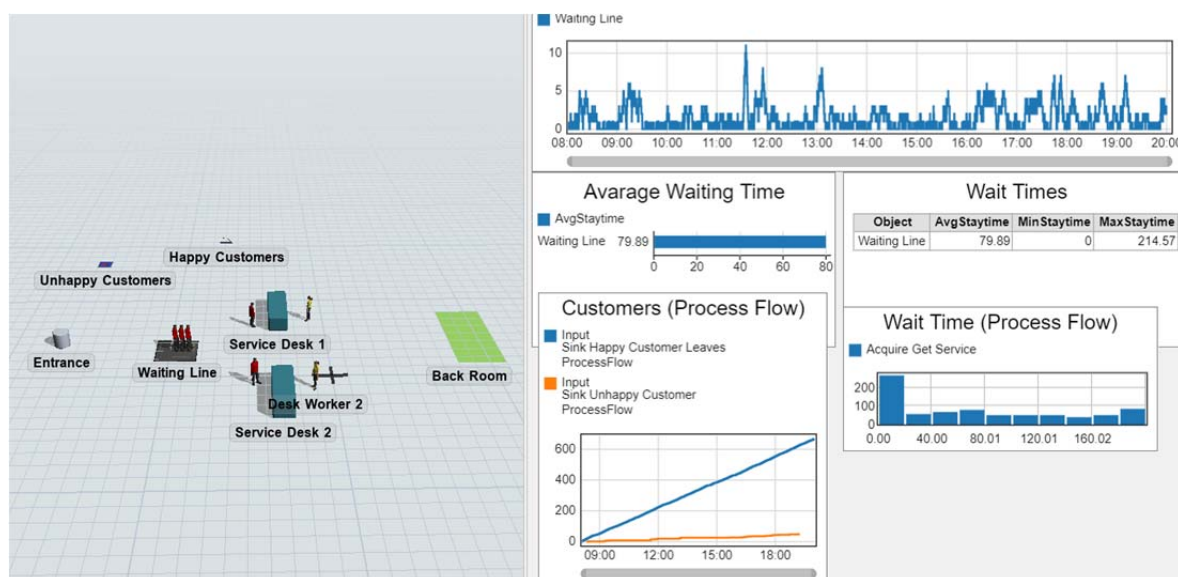


Рисунок 3 – Імітаційна модель з додаванням додаткової служби обслуговування клієнтів
Джерело: розроблено авторами

На основі представлених моделей сервісного центру можна зробити висновок про те, що додавання додаткового сервісного столу (Service Desk 2) зменшило середній час очікування клієнтів у черзі (з 190.97 до 79.89 секунд), а покращення процесу розподілу клієнтів між працівниками зменшило максимальний час очікування (рис. 3). Збільшення пропускну здатності сервісного центру призвело до зростання кількості "щасливих клієнтів" і зменшення кількості "незадоволених клієнтів". Збалансоване навантаження між двома сервісними столами покращило ефективність обробки заявок.

Висновки. Результати моделювання демонструють, що ретельний аналіз і вдосконалення логістичних процесів можуть значно підвищити продуктивність сервісного центру. Оптимізація ресурсів, впровадження додаткових сервісних столів та рівномірний розподіл клієнтських потоків дозволяють підвищити якість обслуговування та забезпечити кращий клієнтський досвід.

Аналіз процесу очікування та часу обслуговування дозволив визначити, що основним фактором затримки є недостатня кількість сервісних столів. Моделювання сервісного центру дозволяє виявити та усунути вузькі місця в обслуговуванні клієнтів, оптимізувавши завантаженість працівників. Впровадження додаткових ресурсів (додаткового сервісного столу) значно покращило якість обслуговування, зменшивши час очікування та підвищивши рівень задоволеності клієнтів. Менший час очікування, в свою чергу, сприяє покращенню клієнтського досвіду.

Таким чином, FlexSim є потужним інструментом для аналізу, оптимізації та вдосконалення складської логістики, що дозволяє легко створити проект моделювання майже для будь-якої бізнес-системи, а підприємствам підвищити ефективність роботи та зменшити операційні витрати.

Список літератури

1. Колесник К., Хуснутдінов М., Трохимчук Р., Артишук І. Імітаційне моделювання складських операцій транспортної компанії. *Computer design systems. theory and practice*. 2023. Vol. 5, No. 1. С. 8-18.
2. Дорошук В.О., Бережняк І.А. Особливості автоматизації складських логістичних процесів. *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища: матеріали XXI МНПК* (м. Київ, 27 жовтня 2023 р.) Київ: НАУ, 2023. 546 с. С. 195-197.
3. Дорошук В.О., Бережняк І.А., Прокопчук О.О. Щодо оптимізаційного моделювання розвитку транспортної системи. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу: збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції* (м. Київ, 14-16 грудня 2022р.). Київ: ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2022. С. 355–357.
4. Гриценко С.І., Смерічевська С.В., Савченко Л.В. Проектування логістичних систем. Навчальний посібник. Київ: НАУ, 2024. 407 с.
5. Парій Л., Виноградчий В., Перерва Т. Обґрунтування заходів з підвищення ефективності управління логістичною системою підприємства. *Київський економічний науковий журнал*. 2023. (2). С. 43-51.
6. Марчук В.Є., Григорак М.Ю., Гармаш О.М., Овдієнко О.В. Складська логістика: навчальний посібник. Київ: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 256 с.
7. Мусатенко О.В. Аналіз структурно-технологічних схем доставки товарів. *Економіка та управління на транспорті*. 2017. Вип. 4. С. 66-71.
8. 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. В.В. Ауліна. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.
9. Mustafa Fatih Yegul, Fatih Safa Erenay, Soeren Striepea, Mustafa Yavuz. Improving configuration of complex production lines via simulation-based optimization. *Computers & Industrial Engineering*. 2017. Vol. 4(109). P. 295-312.
10. Beaverstock, M., Greenwood, A., and Nordgren, W. Applied Simulation Modeling and Analysis Using FlexSim, 5th Edition, FlexSim Software Products, Inc., 2017.

References

1. Kolesnik K., Khusnutdinov M., Trokhimchuk R., & Artishchuk I. (2023). Simulation modelling of warehouse operations of a transport company. *Computer design systems. theory and practice*. 1(5), 8-18 [in Ukrainian].
2. Doroshchuk V.O., & Berezhniak I.A. (2023). Features of automation of warehouse logistics processes. *Problemy pidhotovky profesiinykh kadriv z lohistyky v umovakh hlobalnoho konkurentnoho seredovyscha: materialy KhXI MNPk. Zbirnyk dopovidei*. (pp. 195-197). Kyiv: NAU [in Ukrainian].
3. Doroshchuk V.O., Berezhnyak I.A., & Prokopchuk O.O. (2022). On optimisation modelling of transport system development. *Perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu ta infrastruktury: vyklyky voiennoho chasu: zbirnyk materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 355-357). Kyiv: DP DerzhavtotransNDIproekt [in Ukrainian].
4. Gritsenko S.I., Smerichevska S.V., & Savchenko L.V.. (2024). *Design of logistics systems*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
5. Pariy, L., Vinohradchyi, V., & Pererva, T. (2023). Substantiation of Measures to Increase the Efficiency of Management of the Logistics System of an Enterprise. *Kyivskyi ekonomichnyi naukovyi zhurnal*. (2). 43-51 [in Ukrainian].
6. Marchuk V., Hryhorak M., Harmash O., & Ovdienko O. (2020). *Warehouse logistics*. Kyiv: OLDI-PLUS [in Ukrainian].
7. Musatenko O. V. (2017). Analysis of structural and technological schemes of delivery of goods *Ekonomika ta upravlinnia na transporti*. 4, 66-71 [in Ukrainian].
8. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., Holovaty A.O., & Holub D.V. (2021). *Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems*. V. Aulin (Ed.). Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F. [in Ukrainian].
9. Mustafa Fatih Yegul, Fatih Safa Erenay, Soeren Striepea, & Mustafa Yavuz (2017). Improving configuration of complex production lines via simulation-based optimization. *Computers & Industrial Engineering* 4(109), 295–312. [in English].
10. Beaverstock, M., Greenwood, A., & Nordgren, W. (2017). *Applied Simulation Modeling and Analysis Using FlexSim*, 5th Edition, FlexSim Software Products, Inc. [in English].

Ivanna Berezhniak, Evgeniy Slipenkyi, Viktoriia Doroshchuk, Valeriy Soroka, Assoc. Prof., PhD agricult. sci.
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

Increase the Efficiency of Warehouse Processes by Modelling a Service Centre

The article considers topical issues of improving the efficiency of warehouse processes by modelling a service centre. The main problems arising in the work of warehouses are analysed in detail, in particular, irrational use of warehouse space, imbalance of workload on staff, significant downtime and increased probability of errors in the process of order picking. The article suggests ways to solve these problems with the help of modern modelling methods, which allow optimising warehouse processes and increasing the overall performance of the logistics system.

Particular attention is paid to the modelling of the service centre as a key element of the warehouse system, which ensures effective interaction between different links of the logistics chain. The article discusses various approaches to modelling, including scenario analysis and process modelling. The article also provides practical examples of modelling to optimise warehouse operations, which demonstrate positive results in reducing order processing time, reducing operating costs and improving the accuracy of logistics operations. It is emphasised that an effective solution to the identified problems requires the introduction of modern warehouse process management technologies, including digital modelling, automation of routine operations and the use of artificial intelligence for load forecasting and resource planning. The use of software, such as FlexSim, allows to minimise downtime, balance the workload on staff, improve the use of warehouse space and significantly reduce the number of picking errors.

In addition, the prospects of using warehouse management systems and predictive analytics, which provides management flexibility and increases the competitiveness of enterprises, are considered. Such approaches make it possible to monitor warehouse processes in real time, adjust operations in a timely manner and adapt warehouse operations to changing market conditions. The integrated implementation of these technologies helps to improve warehouse efficiency, ensuring the sustainable development of the logistics system.

efficiency, warehouse processes, service centre, modelling, optimisation, FlexSim, maintenance, personnel

Одержано (Received) 27.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

УДК 656.015.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.280-286](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.280-286)**М. В. Голотюк**, доц., канд. техн. наук, **В. О. Дорошчук**, **І. А. Бережняк***Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
e-mail: m.v.holotiuk@nuwm.edu.ua, v.o.doroshchuk@nuwm.edu.ua, berezhniak_m21@nuwm.edu.ua*

Сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій

У статті розглянуто сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій, що є актуальним питанням для підвищення безпеки та ефективності транспортної інфраструктури. Основна увага приділяється інтеграції інноваційних технологій, інтелектуальних систем управління та інформаційно-аналітичних інструментів для оптимізації руху транспорту в кризових умовах. У статті визначено основні переваги інтеграції сучасних технологій у систему організації дорожнього руху та рекомендовано впровадження адаптивних систем керування рухом.

організація дорожнього руху, надзвичайні ситуації, інтелектуальні транспортні системи, оптимізація, транспортні потоки, безпека дорожнього руху

Постановка проблеми. Дорожній рух є життєво важливою складовою транспортної інфраструктури будь-якого сучасного суспільства, що забезпечує мобільність населення, ефективність економічних процесів та соціальну стабільність. В умовах нормального функціонування дорожньої мережі існують чітко визначені правила регулювання, стандарти безпеки та технологічні засоби контролю, які дозволяють забезпечити безперебійний рух транспорту. Проте надзвичайні ситуації – природні катастрофи, аварії, техногенні кризи, терористичні акти тощо – створюють умови, при яких традиційні методи регулювання дорожнього руху можуть виявлятися недостатньо ефективними. Такі ситуації супроводжуються раптовими змінами у режимах роботи транспортних мереж, пошкодженням інфраструктури, зростанням кількості транспортних засобів, що зупинилися, і збільшенням рівня хаосу на дорогах.

Надзвичайні події створюють низку специфічних викликів для управління дорожнім рухом. Серед них – необхідність швидкого реагування на критичні ситуації, оптимізація маршрутів для евакуації та забезпечення доступу до постраждалих районів, а також мінімізація негативних економічних наслідків через затори і збій нормального функціонування транспортних систем. В умовах надзвичайних ситуацій традиційні методи організації дорожнього руху часто не дозволяють оперативно і ефективно розподіляти транспортні потоки, що спричиняє додаткові затрати часу, ресурсів і негативно впливає на безпеку учасників руху.

Сучасні технології, зокрема інформаційні та інтелектуальні системи, автономні транспортні засоби, дрони, а також інтегровані комунікаційні мережі, відкривають нові можливості для вирішення цих проблем. Інформаційні системи дозволяють збирати, аналізувати і обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу, що забезпечує оперативне реагування на змінні умови надзвичайних ситуацій. Інтелектуальні алгоритми, що базуються на методах машинного навчання, дозволяють прогнозувати виникнення кризових подій, оптимізувати маршрути руху та координувати дії служб реагування. Автономні транспортні засоби, оснащені системами штучного інтелекту, можуть ефективно виконувати завдання евакуації або доставки вантажів навіть у відсутності водія, що значно знижує ризики для життя і здоров'я людей [1, 2].

В умовах надзвичайних ситуацій важливо не лише оперативно реагувати, але й попереджувати можливі кризові події шляхом інтегрованого моніторингу стану дорожнього руху. Сучасні інтегровані системи об'єднують дані з різних джерел (камери

спостереження, сенсори, дрони, супутникові знімки, мобільні додатки) і дозволяють в режимі реального часу оцінювати стан інфраструктури та приймати відповідні управлінські рішення.

Таким чином, сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій базуються на комплексній інтеграції різноманітних технологій та систем управління, що забезпечує підвищення безпеки, оперативності та ефективності транспортних процесів. Актуальність розробки та впровадження таких систем визначається зростанням кількості надзвичайних подій, необхідністю зниження економічних і соціальних витрат, а також покращенням умов життя населення в умовах кризи [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні українські дослідження у сфері організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій характеризуються зростаючим акцентом на інтеграції сучасних інформаційних технологій, інтелектуальних систем управління та автономних засобів контролю. Ряд наукових робіт, представлених українськими дослідниками, свідчить про необхідність розробки комплексних систем, що дозволяють оперативно реагувати на змінні умови надзвичайних ситуацій та забезпечувати ефективну координацію дій служб надзвичайного реагування.

Петренко В. у монографії «Інтелектуальні системи управління транспортними потоками в умовах кризи» підкреслює, що застосування сучасних інформаційних технологій для моніторингу дорожнього руху дозволяє не лише збирати дані з різноманітних джерел (супутникові знімки, відеокамери, сенсори), але й інтегрувати їх у єдину систему управління, що суттєво покращує оперативність реагування під час кризових ситуацій. Автор зазначає, що такі системи сприяють оптимізації розподілу транспортних потоків та зниженню часу евакуації, що є критично важливим при надзвичайних подіях [5].

Іваненко М. та Сидоренко О. у своїй роботі «Адаптивне керування дорожнім рухом під час надзвичайних ситуацій» пропонують алгоритмічні підходи до регулювання циклів роботи світлофорів на основі аналізу даних з сенсорних систем. Вони вказують на позитивний вплив динамічного керування інтервалами сигналізації на зниження заторів і покращення логістики евакуації. Автори доводять, що інтеграція таких адаптивних систем з інформаційними платформами дозволяє досягти значного скорочення часу реагування на надзвичайні події [6].

Також окрему увагу приділено дослідженням з впровадження автономних транспортних засобів у кризових умовах, аналізується ефективність автономних автобусів та інших безпілотних транспортних засобів під час евакуації населення. Автори зазначають, що використання автономних технологій сприяє зменшенню людського фактора та підвищенню точності управління маршрутами, що, у свою чергу, позитивно впливає на безпеку дорожнього руху під час надзвичайних ситуацій [7, 8].

Важливим аспектом досліджень є створення інтегрованих систем комунікації, що забезпечують оперативний обмін даними між місцевими адміністраціями, службами надзвичайного реагування та користувачами доріг. Коваленко та Вілліамс у своїх роботах розглядають практичні приклади використання інтегрованих платформ, які дозволяють в режимі реального часу відстежувати стан дорожньої інфраструктури і оперативно координувати дії між різними структурами [9, 10].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка та комплексний аналіз сучасних підходів до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій, базованих на інтеграції інформаційних технологій, інтелектуальних систем управління та автономних транспортних засобів. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних стратегій організації дорожнього руху, що забезпечують

оперативну реакцію на кризові події та ефективне управління транспортними потоками в умовах нестабільності.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Аналіз існуючих методів організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій;
2. Розробка математичних моделей управління транспортними потоками в умовах надзвичайних ситуацій;
3. Інтеграція інтелектуальних систем управління дорожнім рухом;
4. Аналіз ефективності впровадження сучасних технологій у дорожній рух під час надзвичайних ситуацій;
5. Розробка рекомендацій щодо покращення організації дорожнього руху в кризових ситуаціях.

Запропоновані підходи дозволять підвищити ефективність реагування на надзвичайні ситуації, мінімізувати транспортні затори та покращити безпеку дорожнього руху в умовах нестабільності.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах надзвичайних ситуацій ефективне управління дорожнім рухом набуває особливого значення для забезпечення безпеки учасників руху та оптимізації використання транспортної інфраструктури. Використання сучасних інформаційних технологій, інтелектуальних систем управління та математичного моделювання дозволяє оперативно реагувати на зміни у транспортному середовищі, прогнозувати утворення заторів і оптимізувати маршрути евакуації. У цьому розділі наведено теоретичні аспекти та математичні моделі, що лежать в основі сучасних підходів до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій.

Основною задачею моделювання транспортних потоків є опис та прогнозування поведінки масових систем руху транспортних засобів, що характеризуються великою кількістю елементів і динамічними змінами. Для цього використовуються такі підходи:

Основний принцип, що лежить в основі моделей масового руху, ґрунтується на законах збереження. Для опису динаміки транспортного потоку застосовується рівняння збереження маси:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(x,t) + v(x,t))}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

де $\rho(x,t)$ – густина транспортних засобів у точці x в момент часу t , а $v(x,t)$ – швидкість руху транспортного потоку. Це рівняння дозволяє враховувати вплив локальних змін густини на швидкість руху, що є критично важливим у кризових умовах.

Фундаментальний зв'язок між швидкістю руху та густиною транспортного потоку описується так званою фундаментальною діаграмою, де зростання густини призводить до зниження швидкості, що може спричинити утворення заторів. У простій формі залежність може бути задана функцією $v(\rho)v(\rho)v(\rho)$, наприклад:

$$v(\rho) = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right) \quad (2)$$

де v_f – вільна швидкість руху, а ρ_{\max} – максимальна густина транспортного потоку.

Для оцінки ефективності організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій застосовуються математичні моделі, що дозволяють прогнозувати та оптимізувати параметри транспортної системи.

Модель Лайтхіла-Уізама-Річардса є класичною моделлю макроскопічного опису транспортного потоку. Вона ґрунтується на рівнянні збереження маси і дозволяє моделювати розподіл густини і швидкості транспортних засобів уздовж дороги:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(q)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

де $q = \rho v(\rho)$ – інтенсивність транспортного потоку.

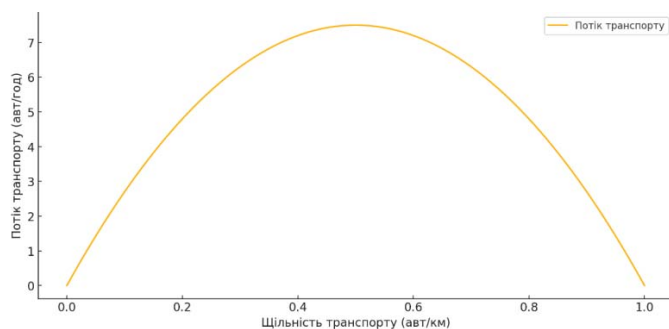


Рисунок 1 – Модель Лайтхіла-Уізама-Річардса (LWR)

Джерело: розроблено авторами

Графічна залежність (рис. 1) відображає залежність щільності транспортного потоку від часу, демонструє типовий характер змін у ситуаціях, коли на дорожню мережу впливають надзвичайні події. У початкові моменти часу спостерігається помірна щільність транспортного потоку, що відповідає нормальному режиму руху. Під впливом надзвичайної ситуації відбувається різке зростання щільності, що свідчить про виникнення заторів і підвищення рівня завантаженості дорожньої інфраструктури.

Подальше зниження щільності після пікового значення пояснюється ефективністю заходів з управління рухом, таких як перенаправлення транспортних потоків, оптимізація режимів роботи світлофорів або впровадження евакуаційних маршрутів. Таким чином, модель LWR дозволяє виявити критичні моменти накопичення транспорту і прогнозувати наслідки кризових ситуацій.

У разі евакуації населення з міста під час стихійного лиха модель дозволяє спрогнозувати утворення заторів на основних транспортних артеріях та оптимізувати маршрути евакуації шляхом коригування обмежень швидкості та спрямування транспортних потоків.

Для оцінки часу очікування транспортних засобів на перехрестях і у заторах застосовуються моделі масового обслуговування. Основне рівняння для середнього часу очікування у черзі:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (5)$$

де L_q – середня кількість транспортних засобів у черзі, λ – інтенсивність надходження транспортних засобів.

Для моделі M/M/1 (одна обслуговуюча лінія) формула має вигляд:

$$W_q = \frac{L_q}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (6)$$

де μ – інтенсивність обслуговування.

Графік (рис. 2) для моделі систем масового обслуговування ілюструє залежність середнього часу очікування у черзі від інтенсивності надходження транспортних засобів. Аналіз показує, що при низькому рівні інтенсивності трафіку (до 5 авто/хв) середній час очікування незначний і майже лінійно залежить від потоку. Однак при подальшому збільшенні інтенсивності спостерігається експоненційне зростання часу затримки, що свідчить про перевищення пропускну здатності дорожньої ділянки.

Це явище підтверджує ефект "вузьких місць", де незначне підвищення транспортного потоку може призвести до суттєвих заторів. Результати аналізу підкреслюють важливість своєчасного регулювання транспортних потоків, особливо у місцях з обмеженою пропускною здатністю, таких як перехрестя, тунелі чи контрольні пункти пропуску.

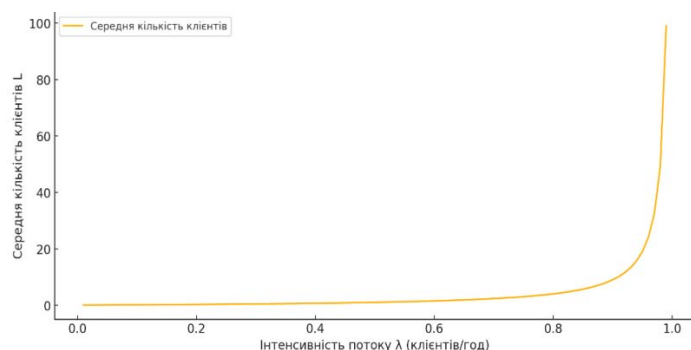


Рисунок 2 – Модель систем масового обслуговування (М/М/с)

Джерело: розроблено авторами

Під час аварій на транспортних вузлах ця модель дозволяє оцінити середній час затримки транспортних засобів і оптимізувати налаштування світлофорів або відкриття додаткових смуг для зменшення заторів.

Адаптивні моделі керування базуються на алгоритмах зворотного зв'язку та машинного навчання. Математично адаптивне регулювання можна описати за допомогою системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) \quad (7)$$

де $X(t)$ – вектор стану транспортної системи (густина, швидкість, інтенсивність), $U(t)$ – керуючі впливи (світлофори, дорожні знаки), та A , B – матриці коефіцієнтів.

Аналіз графічної залежності (рис. 3) для адаптивних систем керування дорожнім рухом вказує на їхню ефективність в умовах змінного транспортного навантаження. У нормальних умовах руху середня швидкість транспортних засобів залишається стабільною на рівні оптимальних значень. Проте під час надзвичайних ситуацій, коли виникають раптові зміни інтенсивності руху, адаптивні системи демонструють здатність підтримувати контрольовану швидкість потоку.

Особливо важливою є здатність цих систем швидко реагувати на критичні ситуації, мінімізуючи негативні наслідки для дорожньої інфраструктури та учасників руху. Це досягається завдяки застосуванню алгоритмів оптимізації фаз світлофорного регулювання, динамічного перенаправлення потоків та інтеграції з інтелектуальними транспортними системами (ІТС).

У великих містах, наприклад у Києві, адаптивні системи керування рухом використовуються для оптимізації роботи світлофорів у реальному часі на основі даних з камер спостереження, що дозволяє зменшити затримки на 15–20 % навіть у пікові години або під час надзвичайних ситуацій.

Сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій ґрунтуються на комплексній інтеграції різних технологій: **системи моніторингу** (забезпечують збір даних із супутникових знімків, камер, сенсорів та дронів); **аналітичні платформи** (використовують алгоритми Big Data для аналізу і прогнозування транспортних потоків); **автономні системи керування** (забезпечують автоматичне регулювання світлофорів та оптимізацію маршрутів евакуації); **інтегровані системи комунікації** (об'єднують дані з різних джерел і дозволяють оперативно координувати дії служб надзвичайного реагування).

Математичне моделювання дорожнього руху за допомогою зазначених моделей дозволяє отримати кількісні показники ефективності системи організації руху в умовах надзвичайних ситуацій. Розрахунки, проведені за допомогою моделі Лайтхіла-Уізама-Річардса, показують, що зміна параметрів густини транспортних засобів впливає на швидкість руху і може призводити до утворення заторів. Аналіз моделей масового обслуговування дозволяє визначити середній час очікування на перехрестях та розробити стратегії оптимізації роботи світлофорів.

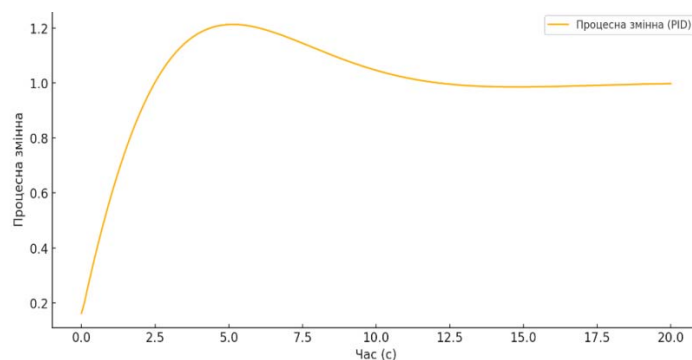


Рисунок 3 – Адаптивні моделі керування рухом

Джерело: розроблено авторами

Адаптивні моделі керування дозволяють автоматизувати процес регулювання, що сприяє оперативній корекції дорожнього руху, мінімізує затори і забезпечує безпечну евакуацію населення. Практичні результати впровадження інтегрованих систем управління підтверджують, що використання сучасних технологій може значно підвищити ефективність роботи транспортної інфраструктури під час кризових ситуацій.

Висновки. У ході дослідження було розглянуто сучасні методи управління дорожнім рухом під час надзвичайних ситуацій. Виявлено, що традиційні підходи не завжди ефективні, оскільки не можуть швидко адаптуватися до змін у дорожній ситуації.

Було розроблено математичні моделі для опису руху транспорту та роботи транспортних вузлів у кризових умовах. Досліджено можливості використання інтелектуальних систем, зокрема штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання, для прогнозування ситуації на дорогах і прийняття рішень у реальному часі.

Проведене імітаційне моделювання дозволило оцінити ефективність різних підходів до керування транспортними потоками. Результати показали, що використання адаптивних алгоритмів та автономного транспорту сприяє зниженню заторів і підвищенню безпеки руху.

На основі отриманих даних сформульовано рекомендації щодо впровадження сучасних технологій в організацію дорожнього руху. Запропоновано інтегровану систему управління, яка поєднує інтелектуальні технології та автоматизовані алгоритми для підвищення ефективності транспортної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій.

Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Кропивницький, 15-17 квітня 2020 р.) Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С.207.
2. Налобіна О.О., Голотюк М.В., Бундза О.З., Шимко А.В. Концептуальна модель оперативного управління транспортною системою в умовах воєнного стану. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*: Науковий журнал. Луцьк. Луцький НТУ, 2023. Том 1. № 20. С.177-186.
3. Ляшенко П. Інноваційні технології організації дорожнього руху: сучасні підходи та перспективи. Дніпро: Дніпровський національний університет, 2020. 210 с.
4. Голотюк М. В., Дорошук В. О., Пахаренко В. Л., Кучерук М. О. Моделювання управління транспортними потоками з використанням інтелектуальних транспортних систем. *Вісник НУВГП, серія: Технічні науки*. Рівне. 2018. Вип. 3(83). С. 110–118.

5. Петренко В. Інтелектуальні системи управління транспортними потоками в умовах кризи. Київ: Національний університет, 2019. 200 с.
6. Іваненко М., Сидоренко О. Адаптивне керування дорожнім рухом під час надзвичайних ситуацій. Харків: Харківський національний університет, 2020. 150 с.
7. Brown K., et al. Adaptive Traffic Signal Control in Emergency Situations. *Transportation Research Journal*. 2019. Vol. 48, No. 3. P. 245–260.
8. Johnson M., Lee S. Data-Driven Traffic Management Systems: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 657–666.
9. Коваленко О. Системи автоматизації у сфері управління транспортними потоками. Львів: Львівський політехнічний університет, 2021. 180 с.
10. Williams D., Thompson R. Emergency Traffic Management: Strategies and Technologies. *Journal of Emergency Management*. 2020. Vol. 18, No. 4. P. 300–315.

References

1. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Holovaty, A.O. (2020). Intelligent transport systems as a result of the introduction of innovative efficient technologies. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability: materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Kropyvnytskyi: TSNTU* [in Ukrainian].
2. Nalobina O., Holotiuk M., Bundza O., & Shymko A. (2023). Conceptual model of the operational management of the transportation system under the conditions of the military state. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*. 20(1), 177-186 [in Ukrainian].
3. Liashenko P. (2020). *Innovative technologies of road traffic organisation: modern approaches and prospects*. Dnipro: Dniprovskiy natsionalnyi universytet [in Ukrainian].
4. Holotiuk M.V., Doroshchuk V.O., Pakharenko V.L., & Kucheruk M.O. (2018). Modelling of traffic flow management using intelligent transport systems. *Visnyk NUVHP*. 3(83), 110-118 [in Ukrainian].
5. Petrenko V. (2019). *Intelligent traffic flow management systems in crisis conditions*. Kyiv: Natsionalnyi universytet [in Ukrainian].
6. M. Ivanenko, O. & Sydorenko. (2020). Adaptive traffic management during emergencies. Kharkiv: Kharkivskiy natsionalnyi universytet [in Ukrainian].
7. Brown K., et al. (2019). Adaptive Traffic Signal Control in Emergency Situations. *Transportation Research Journal*. 3(48), 245–260.
8. Johnson M., & Lee S. 2020. Data-Driven Traffic Management Systems: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2(21), 657–666.
9. Kovalenko O. (2021). *Automation systems in the field of traffic flow management*. Lviv: Lvivskiy politekhnichnyi universytet [in Ukrainian].
10. Williams D., & Thompson R. (2020). Emergency Traffic Management: Strategies and Technologies. *Journal of Emergency Management*. 4 (18), 300–315.

Mykola Holotiuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktoriiia Doroshchuk**, **Ivanna Berezniak**

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

Modern Approaches to Traffic Management in Emergency Situations

The article discusses modern approaches to the organization of traffic in emergency situations, which is an urgent issue for improving the safety and efficiency of transport infrastructure. The main focus is on the integration of innovative technologies, intelligent control systems and information and analytical tools to optimize traffic in crisis conditions. The study analyzes the existing methods of traffic management during emergencies, such as natural disasters, man-made accidents, and military threats. It is proposed to use three main mathematical models to evaluate the effectiveness of traffic management: the Lighthill-Whizam-Richards (LWR) model, the queuing system model (QSM), and adaptive traffic management models. The LWR model allows predicting changes in traffic density depending on traffic volume and road conditions.

The CMO model is used to analyze the operation of critical transportation hubs and assess their congestion levels, which is important for determining road capacity. Adaptive traffic management models provide flexible real-time traffic control through the use of machine learning and artificial intelligence algorithms. The modeling results, presented in the form of graphs and histograms, demonstrated the impact of various factors on traffic efficiency.

The analysis of the data obtained has confirmed that the use of intelligent control systems can reduce congestion time, increase road capacity, and ensure prompt response to emergencies. The article identifies the main advantages of integrating modern technologies into the traffic management system: increasing the efficiency of traffic management, reducing the risk of accidents and improving the overall mobility of the population in emergency situations. It is recommended to introduce adaptive traffic management systems based on the analysis of real traffic to ensure the resilience of transport infrastructure to crisis impacts.

traffic organization, emergencies, intelligent transport systems, optimization, traffic flows, road safety

Одержано (Received) 27.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 05.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

УДК 656.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.287-293](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.287-293)**В. О. Дорошук, І. А. Бережнюк, Є. Б. Сліпенький***Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна**e-mail: v.o.doroshchuk@nuwm.edu.ua, berezhniak_m21@nuwm.edu.ua,**e.b.slipenkyi@nuwm.edu.ua*

Організація дорожнього руху поза межами населених пунктів

У статті досліджується організація дорожнього руху поза межами населених пунктів. Метою дослідження є вивчення закономірностей впливу характеристик транспортного потоку на рівень безпеки дорожнього руху на міжміських автомобільних дорогах. Для оцінки рівня безпеки дорожнього руху визначено структуру транспортного потоку та коефіцієнти аварійності на ділянці автомобільної дороги поза межами населених пунктів. Дане дослідження спрямоване на підвищення рівня безпеки дорожнього руху на автомобільних дорогах поза населеними пунктами. Основним завданням дослідження є визначення та оптимізація швидкісного режиму транспортних засобів.

організація дорожнього руху, безпека руху, дорожньо-транспортні пригоди, транспортний потік, швидкість руху, транспортні засоби

Постановка проблеми. У контексті зростання рівня автомобілізації актуалізується проблема ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі з урахуванням вимог безпеки дорожнього руху. За межами населених пунктів вирішення цієї проблеми досягається шляхом збільшення пропускної здатності доріг та оптимізації їх геометрії.

Висока смертність на дорогах – серйозна проблема, яка вимагає нових підходів до організації руху та розвитку транспортної системи.

Забезпечення безпеки дорожнього руху є пріоритетним завданням міжнародного масштабу, що потребує системного та комплексного підходу. Ефективне вирішення цієї проблеми передбачає інтеграцію стратегічних та оперативних заходів, спрямованих на зниження рівня аварійності та травматизму, а також підвищення стійкості транспортної системи. Для досягнення цих цілей використовуються різноманітні методи та моделі, що дозволяють оптимізувати управління транспортною системою шляхом залучення технічних та інтелектуальних ресурсів. Щоб ефективно керувати рухом транспорту, потрібен інструмент, який допоможе аналізувати ситуацію в реальному часі, прогнозувати розвиток подій, приймати правильні рішення та оцінювати їхні результати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному світі, де кількість автомобілів на дорогах постійно зростає, проблема безпеки дорожнього руху набуває глобального масштабу. Наслідки дорожньо-транспортних пригод, такі як людські жертви, травми, забруднення навколишнього середовища та економічні втрати, є неприпустимими та потребують негайного вирішення.

Дослідженням питання організації дорожнього руху займалися багато науковців, серед яких В.В. Сильянова, О.Ю. Цибенко, С. Бутник, О.П. Дзюба, М. Лазаренко, В.П. Поліщук, А. Філіппов, І. Горбачева, Б.М. Головкін, А.Б. Вознюк, Д. Козар, В.Б. Кисельова, О. Шумейко, Ганс Келер, Майкл Джонсон та інші. Їхні наукові дослідження охоплюють широкий спектр питань, пов'язаних з цією проблематикою.

У наукових роботах вивчається можливість використання теорії прийняття рішень для вирішення практичних проблем управління дорожнім рухом.

Існуючі наукові результати є важливими для розвитку транспортної системи, але висока смертність на дорогах вимагає нових рішень. Особливо це стосується міст, де інтенсивність руху та складність дорожньої мережі створюють підвищені ризики.

Незважаючи на численні дослідження, проблема визначення місць, де найчастіше трапляються ДТП, залишається актуальною через значні витрати на її вирішення. Тому необхідні подальші дослідження та розробка нових методів для покращення безпеки дорожнього руху.

Статистика аварійності на дорогах України свідчить про серйозну проблему з безпекою дорожнього руху. Кількість дорожньо-транспортних пригод щороку зростає, в тому числі з загиблими і травмованими, і в 2024 році становить 25781, що на 9% більше порівняно з 2023 р.). Рівень смертності в Україні значно перевищує середньоєвропейські показники, а економічні збитки від ДТП становлять значну частку ВВП [11].

Розвиток теорії транспортних потоків досяг значних успіхів, проте її практичне застосування обмежене рядом об'єктивних факторів. Серед них: нестабільність та різноманітність транспортних потоків, суперечливість критеріїв оцінки якості управління рухом, непередбачуваність дорожніх умов та неточність виконання рішень з управління рухом [13].

Дослідження стану автомобільних доріг загального користування в Україні виявило проблему недостатньої пропускної здатності, що призводить до неефективного функціонування транспортної системи. Відсутність раціональної організації дорожнього руху призводить до збільшення часу та вартості перевезень.

Постановка завдання. Перевантаження трафіку – це стан транспортної мережі, що характеризується зниженням швидкості руху, збільшенням часу поїздки та накопиченням транспортних засобів внаслідок перевищення попиту на проїзд над пропускною здатністю.

Зростання інтенсивності транспортних потоків та зміна їх характеристик висувають підвищені вимоги до систем управління та організації дорожнього руху. Для забезпечення необхідного рівня безпеки та ефективності руху необхідна оптимізація параметрів вулично-дорожньої мережі

Рух автомобіля – це складний процес, в якому взаємодіють водій, автомобіль, дорога та навколишнє середовище. Цю взаємодію називають системою "ВАДС". Забезпечення ефективного та безпечного функціонування даної системи вимагає комплексного підходу, що включає в себе вдосконалення підготовки водіїв, підвищення якості транспортних засобів, розвиток дорожньої інфраструктури та оптимізацію організації дорожнього руху [6].

Удосконалення системи оперативного управління безпекою дорожнього руху є важливим кроком у вирішенні проблеми смертності на дорогах.

Вирішення проблеми аварійності на дорогах України вимагає системного підходу, що включає модернізацію дорожньої інфраструктури, вдосконалення системи підготовки водіїв, впровадження інноваційних технологій у сфері безпеки дорожнього руху та посилення відповідальності учасників дорожнього руху.

Структурний склад транспортного потоку є визначальним фактором, що впливає на його параметри. Зростання частки вантажних транспортних засобів та автопоїздів, що характеризуються відмінними динамічними та гальмівними характеристиками, призводить до збільшення диференціації транспортного потоку за швидкістю руху.

Виклад основного матеріалу. У сучасній транспортній галузі широко застосовується метод моделювання для оцінки ефективності різних варіантів організації дорожнього руху. Спеціалізоване програмне забезпечення дозволяє створювати комплексні моделі, що враховують транспортний попит, пропозицію та їх взаємодію. Комп'ютерні програми допомагають фахівцям у транспортній сфері приймати рішення, моделюючи різні сценарії та оцінюючи їх ефективність.

Необхідність адаптації до динамічних змін структури транспортного потоку та локальних умов зумовлює потребу в періодичному перегляді і розширенні переліку коефіцієнтів аварійності на основі аналізу статистичних даних ДТП.

З метою оцінки рівня безпеки дорожнього руху на заданій ділянці автомобільної дороги коефіцієнти аварійності класифіковано за трьома групами відповідно до їхньої сталості. Розподіл коефіцієнтів за групами представлено на схемі (рис. 1).

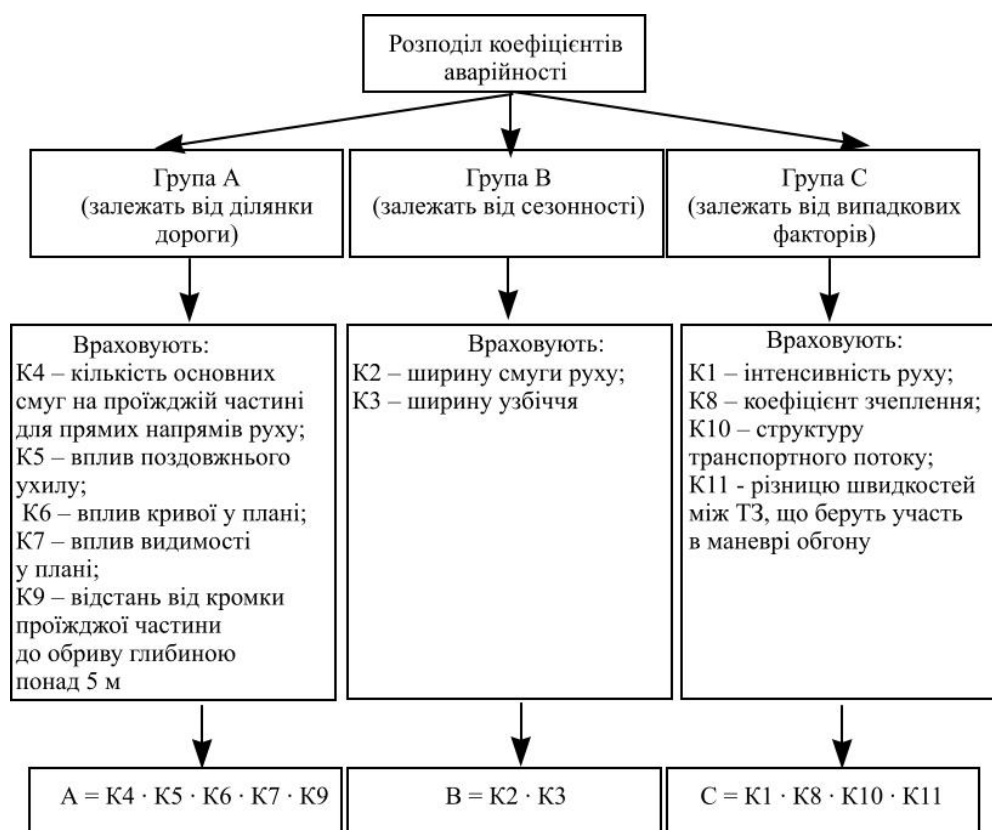


Рисунок 1 – Розподіл коефіцієнтів за групами

Джерело: розроблено авторами

Враховуючи значення коефіцієнтів різних груп цільова функція підсумкового коефіцієнта аварійності прямує до мінімуму і матиме вигляд:

$$K_{\text{підсум}} = A \cdot B \cdot C \rightarrow \min \quad (1)$$

де $K_{\text{підсум}}$ – цільова функція підсумкового коефіцієнта аварійності.

Низький підсумковий коефіцієнт аварійності свідчить про високий рівень безпеки дорожнього руху на конкретній ділянці автомобільної дороги.

З метою врахування структури транспортного потоку всі транспортні засоби були класифіковані на чотири групи відповідно до їхніх категорій: мотоцикли (L), легкові автомобілі (M1), вантажівки та автопоїзди (N2, N3, N+O3,4) та автобуси (M2,3).

Аналіз швидкісних характеристик транспортного потоку виявив високу дисперсію швидкостей руху транспортних засобів, при цьому половина водіїв перевищує встановлені обмеження. Також було встановлено, що транспортний потік характеризується неоднорідністю швидкостей, з диференціацією швидкостей між

транспортними засобами, що здійснюють маневр обгону, в діапазоні від 11 до 70 км/год (рис. 2).

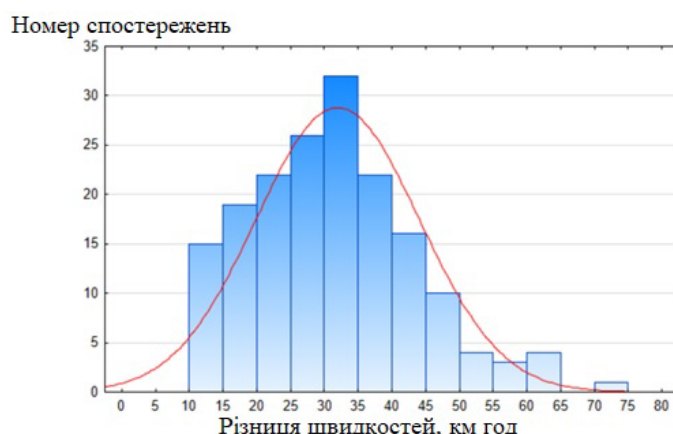


Рисунок 2 – Графічне представлення розподілу величини різниці швидкостей між транспортними засобами, що беруть участь в маневрі обгону

Джерело: розроблено авторами

Гетерогенність транспортного потоку є фактором, що зумовлює підвищення частоти здійснення маневрів обгону, що обумовлено диференціацією динамічних та гальмівних характеристик транспортних засобів різних категорій.

Дослідження показало, що ймовірність обгону на небезпечних ділянках дороги залежить від характеристик транспортного потоку:

$$y = 0,0001 \cdot x_1 + 0,0008 \cdot x_2 - 0,0181 \cdot x_3 + 0,0017 \quad (2)$$

де y – вірогідність здійснення маневру обгону групою транспортних засобів;

x_1 – частка категорій транспортних засобів М2, М3, N2, N3, N+O3,4, %;

x_2 – різниця швидкостей між транспортними засобами, що обганяють і яких обганяють, км/год;

x_3 – коефіцієнт завантаження рухом.

На основі отриманих даних було виведено формулу для визначення безпечної швидкості обгону в умовах гарної видимості та сухого дорожнього покриття. Ця формула враховує кількість вантажних автомобілів, автобусів та автопоїздів у транспортному потоці:

$$V_{\text{без}} = V_{\text{п}} + 18,90 - 0,51 \cdot \alpha \quad (3)$$

де $V_{\text{без}}$ – безпечна швидкість обгону з урахуванням структури транспортного потоку, км/год;

$V_{\text{п}}$ – середня швидкість транспортного потоку, км/год;

$$V_{\text{п}} = V_0 \cdot \theta \cdot \vartheta - \alpha \cdot K_a \cdot N \quad (4)$$

де V_0 – швидкісний режим легкових автомобілів, що спостерігається на прямолінійній горизонтальній ділянці дороги з наступними характеристиками: ширина проїжджої частини – 7,5 м, ширина крайових смуг – 0,75 м, ширина укріплених узбіч – 3,5 м, за умови низького коефіцієнта завантаження;

θ – інтегральний коефіцієнт, що характеризує вплив геометричних параметрів дорожнього полотна, складу транспортного потоку та засобів організації дорожнього руху на швидкість вільного руху транспортних засобів;

ϑ – коефіцієнт, що відображає середній вплив стану дорожнього покриття на швидкість транспортного потоку з урахуванням погодних умов;

α – коефіцієнт, що відображає вплив співвідношення різних типів транспортних засобів на характеристики транспортного потоку;

Ka – коригувальний коефіцієнт, що відображає вплив розмітки, інтенсивності руху, кривих ділянок дороги та поздовжніх ухилів на швидкість руху транспортного потоку;

N – інтенсивність руху, авт/год.

На основі експериментальних даних, після їх обробки та аналізу, була розроблена регресійна модель.

$$K_{11} = 0,05 \cdot \Delta V + 1 \quad (5)$$

де K_{11} – коефіцієнт аварійності;

ΔV – різниця швидкостей між транспортними засобами, що беруть участь в маневрі обгону.

$$\Delta V = V1 - V2 \quad (6)$$

де $V1$ – швидкість автомобіля, який виконує обгін, км/год.;

$V2$ – швидкість автомобіля, якого обганяють, км/год.

Встановлена залежність надає можливість врахування режимів руху транспортних засобів при проведенні оцінки рівня безпеки дорожнього руху (рис. 3).

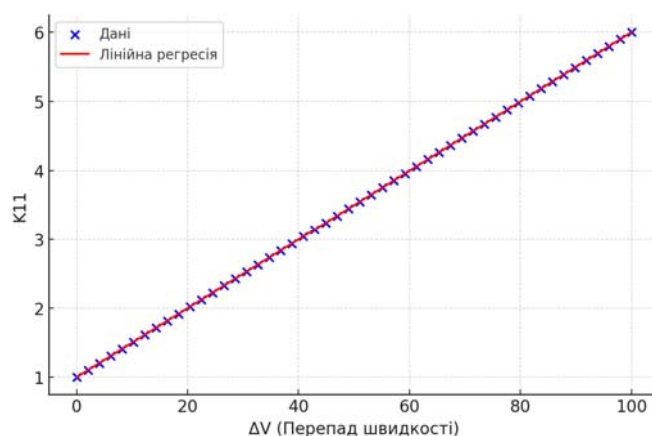


Рисунок 3 – Графічне представлення регресійної моделі.

Джерело: розроблено авторами

За допомогою регресійного аналізу можна: ідентифікувати ключові фактори, які впливають на безпеку, визначити їхній внесок і взаємодію; прогнозувати рівень безпеки, оцінюючи, як зміна параметрів режиму руху (наприклад, збільшення середньої швидкості або зміна інтенсивності потоку) може вплинути на аварійність; оптимізувати організацію руху, розробляючи рекомендації щодо впровадження адаптивних систем контролю (наприклад, систем «розумних світлофорів» або автоматичного контролю швидкості), що враховують специфічні умови руху.

Завдяки отриманим даним можна буде розробити рекомендації щодо покращення інформування водіїв на небезпечних ділянках доріг.

Для підвищення безпеки дорожнього руху на небезпечних ділянках необхідно надавати водіям інформацію про поточну дорожню обстановку, швидкість транспортного потоку та безпечну швидкість обгону з урахуванням складу транспортного потоку. Це може бути реалізовано шляхом встановлення динамічних

інформаційних табло, які оновлюватимуть інформацію в режимі реального часу на основі даних з датчиків інтенсивності руху, швидкості та стану дорожнього покриття.

Висновки. Організація дорожнього руху поза межами населених пунктів – це комплексна задача, що вимагає уваги до деталей та використання сучасних технологій. Встановлено, що ключовими факторами, які впливають на безпеку руху на міжміських дорогах, є склад транспортного потоку та різниця швидкостей між транспортними засобами, що здійснюють маневр обгону. Швидкісні характеристики різних типів транспортних засобів безпосередньо впливають на безпеку обгону, визначаючи необхідну дистанцію, час маневру та рівень ризику виникнення аварійної ситуації. Тому визначення безпечної швидкості обгону на міжміських дорогах дозволить підвищити безпеку руху, зменшенням ризику аварій, пов'язаних із неправильним або ризикованим обгоном, завдяки чітко встановленим параметрам для цього маневру, а також забезпечити гармонійне злиття швидкостей різних типів транспортних засобів, що сприяє зниженню заторів та конфліктів між учасниками дорожнього руху.

Сучасні дослідження підтверджують важливість комплексного підходу до організації дорожнього руху поза містами. Використання інноваційних технологій, підвищення безпеки та екологічна складова є пріоритетними напрямками розвитку. Подальші дослідження необхідні для впровадження ефективних рішень на практиці та вдосконалення існуючих методів контролю й управління дорожнім рухом.

Для покращення організації дорожнього руху поза межами населених пунктів та підвищення безпеки на дорогах необхідно впроваджувати інтелектуальні транспортні системи для моніторингу трафіку та надання водіям актуальної інформації, використовувати адаптивне освітлення та дорожньої розмітки для підвищення безпеки, оптимізувати розташування знаків обмеження швидкості та камер контролю, впроваджувати технології зимового утримання доріг, зокрема підігріву дорожнього покриття, запроваджувати окремі смуги для автономного та громадського транспорту, на ділянках доріг з обмеженою видимістю необхідно облаштовувати смуги для обгону, які дозволять.

Список літератури

1. Горбачева І.М. Зарубіжний досвід боротьби з порушеннями правил безпеки руху та експлуатації транспорту. *Вісник Асоціації кримінального права України*. 2017. № 1(8). С. 203-212.
2. Головкін Б.М. Оцінка дорожньо-транспортної аварійності та тяжкості її наслідків в Україні. Проблеми законності. *Вісник асоціації кримінального права України*. 2022. Вип. 156. С. 52–75.
3. Бутник С. Про вдосконалення законодавства щодо забезпечення безпеки дорожнього руху. *Правова інформатика*. 2013. № 1 (37). С. 86–93.
4. Козар Д.К. Зарубіжний досвід забезпечення патрульною поліцією безпеки дорожнього руху. *Честь і закон*. 2020. № 1 (72). С. 52–58.
5. Шумейко О.А. Зарубіжний досвід забезпечення безпеки дорожнього руху за допомогою автоматизованих систем (на прикладі деяких країн Європи та США). *Науковий вісник публічного та приватного права*. 2016. Вип. 6, Т. 2. С. 77-82.
6. Кашканов, А.А., Кужель В.П. Організація дорожнього руху. Вінниця : ВНТУ, 2017. 125 с.
7. Кишун В. Організація і безпека дорожнього руху: конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.070101 Транспортні технології усіх форм навчання. Луцьк: Луцький НТУ, 2014. 200 с.
8. Дорошук В., Бережнюк І., Організація міжнародного дорожнього руху при перевезенні вантажів. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: матеріали VI МНПК (м. Кропивницький, 22-24 листоп. 2023 р.). Кропивницький, 2023. С. 119-120.
9. Горбачов П.Ф., Ву Дик Мінь, Штанько І.І. Закономірності розподілу швидкості руху транспортних засобів на міських вулицях. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. № 4(2). С. 163–169.
10. Бережнюк І.А., Дорошук В.О. Транспортна безпека в Україні. *Транспорт : наука та практика*: матеріали III МНПК (м. Одеса, 16 травня 2024 р.). Одеса: ОНМУ, 2024. С. 215-219.
11. Бережнюк І.А., Дорошук В.О. Стратегії зменшення аварійності та смертності на дорогах. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції (м. Вінниця, 23-25 жовтня 2023 р.). Вінниця: ВНТУ, 2023. С. 58-59.
12. Дорошук В.О., Бережнюк І.А., Коваль А.В. Моделювання транспортних потоків. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (м. Кропивницький, 19-21 квітня 2023 р.). Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С. 122–123.

13. Hardy, M., Wunderlich K. Traffic Analysis Tools Volume IX. Work Zone Modeling and Simulation – A Guide for Analysts. Report No. FHWA-HOP-09-001. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, DC. March 2009. URL: ops.fhwa.dot.gov/wz/traffic_analysis/tatv9_wz/tatvol_9.pdf (дата звернення: 05.01.2025).

References

1. Gorbacheva, I.M. (2017). Foreign experience in combating violations of traffic safety and transport operation rules. *Visnyk Asotsiatsii kryminalnoho prava Ukrainy*, 1(8), 203-212 [in Ukrainian].
2. Golovkin, B.M. (2022). Assessment of road traffic accidents and the severity of their consequences in Ukraine. Problems of legality. *Visnyk Asotsiatsii kryminalnoho prava Ukrainy*, 156, 52-75 [in Ukrainian].
3. Butnyk, S. (2013). On improving legislation on road safety. *Pravova informatyka*, 1 (37), 86-93 [in Ukrainian].
4. Kozar, D.K. (2020). Foreign experience in ensuring road safety by patrol police. *Chest i zakon*, 1 (72), 52-58 [in Ukrainian].
5. Shumeiko, O.A. (2016). Foreign experience of ensuring road safety with the help of automated systems (on the example of some European countries and the USA). *Naukovyi visnyk publichnoho ta pryvatnoho prava*. 6(2), 77-82 [in Ukrainian].
6. Kashkanov, A.A., & Kuzhel, V.P. (2017). *Organisation of road traffic*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
7. Kyshchun, V. (2014). *Organisation and safety of road traffic: notes for students of the training direction 6.070101 Transport technologies of all forms of education*. Lutsk: Lutsk NTU [in Ukrainian].
8. Doroshchuk, V., & Berezniak, I. (2023). Organisation of international road traffic in the carriage of goods. *Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 119-120). Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
9. Gorbachev, P.F., Vu Dik Minh, & Shtanko, I.I. (2020). Regularities of vehicle speed distribution on city streets. *Suchasni informatsiini systemy*. 4(2), 163-169. [in Ukrainian].
10. Berezniak I.A., & Doroshchuk V.O. (2024). Transport security in Ukraine. *Transport: nauka ta praktyka: materialy konferentsii*, (pp. 215-219). Odesa: ONMU [in Ukrainian].
11. Berezniak, I.A., & Doroshchuk, V.O., (2023). Strategies for reducing accidents and mortality on the roads. *Suchasni tekhnohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu: materialy XVI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 58-59). Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
12. Doroshchuk, V.O., Bereznyak, I.A., & Koval, A.V. (2023). Modelling of traffic flows. *Pidvyshchennia nadiinosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system: materialy V mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 122-123). Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
13. Hardy, M., & Wunderlich K. (2009). Traffic Analysis Tools Volume IX. Work Zone Modeling and Simulation – A Guide for Analysts. (FHWA-HOP-09-001. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.

Viktoriia Doroshchuk, Ivanna Berezniak, Evgeniy Slipenkyi

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

Traffic Management Outside Settlements

The article investigates the organisation of traffic on intercity motorways outside settlements. The main purpose of the research is to study the patterns of influence of traffic flow characteristics on the level of road safety. The organisation of traffic outside settlements has its own characteristics that differ from the conditions of urban roads, so an important task is to ensure the safety and efficiency of vehicle movement at high speeds. Ensuring road safety is an international priority that requires a systematic and comprehensive approach. An effective solution to this problem involves the integration of strategic and operational measures aimed at reducing the level of accidents and injuries, as well as increasing the sustainability of the transport system.

The study assesses the level of road safety by determining the structure of traffic flow and accident rates on a selected section of an intercity road. The key factors affecting traffic safety are analysed: vehicle speed, traffic intensity, vehicle types and road conditions. The results of the study show that optimisation of the speed regime is one of the most important aspects of improving road safety. Particular attention is paid to the analysis of the relationship between traffic intensity and accident rate. It is established that excessive traffic density or excessively high speeds significantly increase the risk of road accidents. Approaches to regulating the speed regime based on traffic flow modelling are proposed, which allows achieving an optimal balance between transport efficiency and road safety.

In addition, the use of intelligent transport systems (ITS) for real-time traffic monitoring and control is investigated. The introduction of such systems increases the adaptability of road infrastructure to changes in traffic flows, which has a positive impact on safety. Thus, the results of the study and the proposed recommendations can be applied to the design of new and reconstruction of existing road networks, which will help reduce accidents and improve road safety outside of settlements.

traffic management, traffic safety, road accidents, traffic flow, traffic speed, vehicles

Одержано (Received) 27.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

UDC 65.338.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.294-300](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.294-300)

Nataliia Rozhko, Prof., Dr. econ. sci., **Yurii Vovk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sofiiia Rozhko**
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine
e-mail: rozhko18@googlemail.com

Forming a Symbiosis of the Transport Services Market and Innovation in Transport

This study aims to establish a harmonious interaction between the transport services market and innovation development in the transport sector. A comprehensive set of measures must be implemented to ensure a long-term presence in the European transport services market. These measures should promote the achievement of sustainable development goals, creation of a unified European transport system, strengthening of competitive advantages, and efficient management of resources in transport and logistics companies.

The article examines the functioning of transport services market in the context of innovative activities and construction of an organizational and economic platform for its operation. It establishes that transport services market's success hinges on introducing innovations and investments, as these processes significantly impact any country's economy.

The key factors in forming the transport services market are outlined: organizational, economic, social and cultural, political, managerial, military, infrastructure, and resource-related. The article also identifies main trends in the formation and development of transport services market.

transport services market, transport system, innovation, innovation activity, investment, technological progress, digitalization

Problem statement. An important component of the symbiosis of transport services market is the introduction and use of innovations and know-how to maximize the availability and profitability of transport logistics in interregional and international communication. The expansion of global and regional markets is primarily due to the increase in international contacts between Ukraine, the EU, the US, and other countries providing military and humanitarian assistance after the introduction of martial law in Ukraine. Introducing large-scale innovative technologies requires a clear organization and conduct of various calculations and research preparatory work, of which transport services market is a part. Analyzing transportation services market in Ukraine, it can be noted that main obstacle on the agenda is the lack of innovation, which prevents this sector from reaching the level of the world's leading countries.

Analysis of key research and publications. Such scholars have considered the issues of justifying the need for innovation as A. Atkinson, I. Alekseev, I. Aleksandrov, S. Beera, M. Vovk, P. Grechan, H. Dmytryk, P. Doyle, M. Kyzym, T. Klebanova, S. Ilyashenko, M. Krupka, O. Lapko, O. Novalska, and many others. At the same time, it is currently important to improve legal, organizational, and economic mechanisms for the development of transport system using European experience, attracting investments in infrastructure development and formation of transport hubs and intersectoral clusters, effective spatial planning and large-scale implementation of the latest technologies [2]. Despite minor achievements in the use of innovations in transport, insufficient attention is paid to the problem of innovative development of transport system at the regional level, which requires further systematic analysis and study.

Task setting. The main objective of this study is to form a symbiosis of the functioning of transport services market and innovation, as well as to analyze the status and prospects of organizational and economic platform for the functioning of transport services market at the regional level. To achieve this goal, the following tasks should be carried out: to consider the model of the organizational and economic platform for the functioning of transport services market, as well as the factors of formation of the organizational and economic platform for the functioning of transport services market; main trends in the formation and development of transport services market in modern conditions.

Summary of the primary material. Modern wartime economy of Ukraine is significantly inferior to the advanced innovative economies of the West and needs a radical change in the development model. This problem is particularly acute in the context of the full-scale military aggression that Ukraine is experiencing from Russia. In this regard, globalization of the road transportation market is of particular interest. New technologies, demographic and climate change, and the growing demand for the transportation of military goods are all factors driving freight traffic growth in all regions of the world. Improved connectivity between regions is changing how goods are delivered to their destinations. Supply chains are transforming as new markets emerge, and technological advances make the delivery process more efficient.

Demand, supply, and competition are the basis of any market, including road transportation market. The demand in transport services market and the formation of the market are based on the laws of social and economic development and social effects, which are governed by the laws of the market (law of value, law of demand, law of supply, law of competition, laws of money circulation), as well as the presence of subjects and objects of market relations.

The main features of transportation services market include: high degree of differentiation of services (associated with diversification, personalization, and individualization of demand for services); high dynamism of market processes; territorial segmentation; high sensitivity to changes in market conditions; specifics of the organization of service production.

The market for transportation products is in the formation process, with definite transitional processes and inherent uncertainty. The nature and dynamics of these processes significantly depend on the system's structure. In turn, the structure of transportation market includes two main interacting entities: the transportation system and the consumer of transportation products – the shipper and the consignee. The peculiarities of behavior of these entities in certain situations determine the state of the system and the type and structure of the model that describes this state.

All these components form the organizational and economic platform for the functioning of the transport services market (Fig. 1).

The operation of transportation services market is ensured by the compliance of all market participants, starting with producers, intermediaries, and ending with consumers, with the following market functions: regulatory, stimulating, distributing, integrating, informational, sanitizing, social, and intermediary. Compliance with these functions ensures free movement of goods, guarantees relationship between various industries and business entities, establishes proportions in a market economy, and forms a continuous process of transport services market.

Within the organizational and economic platform for the functioning of transport services market, an important role in the formation of this order plays the following factors:

- organizational factors include conditions of the material environment, the content of work and social conditions of activity of various market entities;
- economic factors characterize existence of healthy competition in the market, formation of carrier's competitiveness in foreign and domestic markets;
- social and cultural factors reflect the society's values and social and cultural characteristics, available number of consumers in the region, their average income, moral values, etc. They have a significant impact on customer behavior and, thus, have a significant impact on market sales;

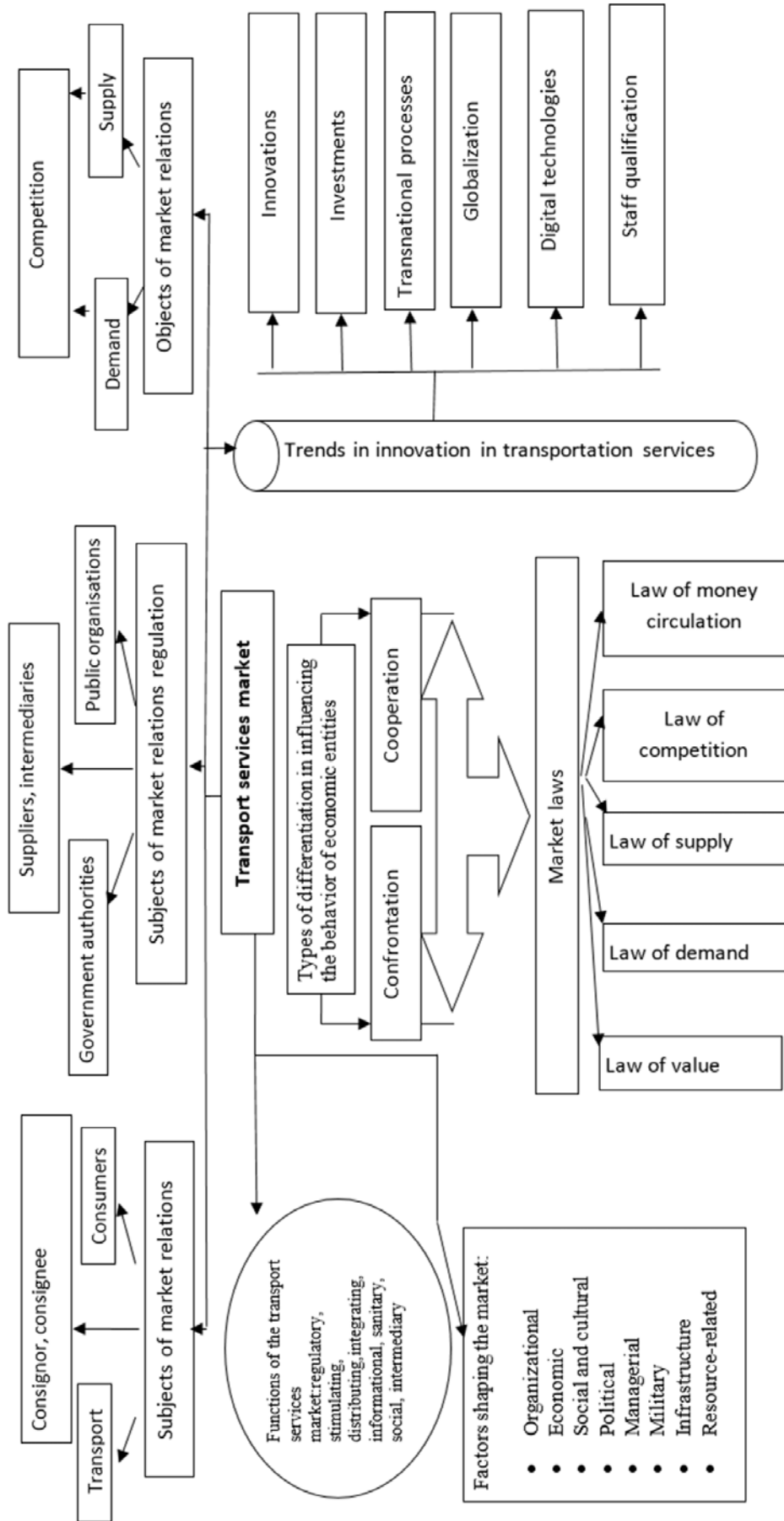


Figure 1 – Organizational and economic platform for the functioning of the transport services market

Developed by the author

– political factors usually include political situation in the country; martial law; instability; loyalty to the government; protectionism in the industry; administrative barriers; and the property protection system. However, it is advisable to take into account such important driving forces as changes in the social and political system, religious preferences, and the revival of nationalism;

– managerial factors are very important, as they ensure the analysis of the situation, correct decision-making at all stages of cargo delivery in the market;

– soldiers take into account the level of threat of armed conflicts, a sharp decline in imports or exports, introduction of embargoes and various trade sanctions designed to suppress the market economically;

– infrastructure factors are “capable of ensuring transparency of the process of sale of commodity products by producers”. They include “...production, social, transport, engineering infrastructures - provision of the territory with production, social, transport (roads, transport facilities) and engineering (engineering networks, engineering structures) resources that determine the functioning and reproduction of its social and economic system”.

– resources in the transportation services market characterize the availability of technologies and conditions for storing products. “The study of the storage processes of final products is of high importance because by knowing the norms and period of their storage, it is easy to determine whether the goods are suitable for consumption, as well as what conditions should be created to make the products tasty and healthy for longer.”

The transportation services market in Ukraine is the lifeblood of the economy, which armed aggression of the Russian Federation has radically changed. The invasion has virtually paralyzed Ukraine's export capabilities, and attempts to transport grain by land have led to a logistical collapse.

Since transportation of goods by sea and rail has its limitations, the domestic transportation market has begun to prioritize road transportation for cargo transportation, and shippers and carriers have been forced to change the logistics of export transportation and direct cargo to western border crossings.

Organizing road transportation has become challenging due to the low capacity of border crossings in western Ukraine, and the cost of logistics has increased significantly as the distance to EU ports has increased many times.

In addition, businesses have faced problems in European ports on a massive scale. This also applies to the work of customs and other regulatory authorities, terminal operating hours, and service quality. Ukrainian shippers are used to receiving information 24/7, so they felt a big difference when they started working with logistics companies in Romania, Poland, and Turkey.

As many cargoes were sent to land routes, the checkpoints were blocked. For example, in August and September, the situation on the Ukrainian-Polish border in the direction of the Yahodyn checkpoint was catastrophic.

There were also positive developments in road transportation during the war. The state introduced so-called transport visa-free regime or abolished administrative barrier through road transportation permits, which was a deterrent to the free market.

It was a massive pain for road carriers, logisticians, and freight forwarders: every year, there was a shortage of permits, and negotiations were underway to increase their number. The abolition of this administrative barrier intensified international road transportation and economic processes in general.

Today, businesses have adapted, reoriented, and developed new export routes via land corridors through European countries. They can be divided into two global directions: the western transport corridor to Poland, Germany, and the Baltic countries, and the southern transport corridor, mainly to Romania.

While the western border is struggling with traffic congestion, checkpoint capacity, differences in railroad gauge, and other challenges, the situation on the southern border is

somewhat different but no less intriguing: corruption at customs, not only on the Ukrainian side but also on the Romanian side.

Despite all the hardships, considerable assistance from fellow freight forwarders from neighboring countries is worth noting. Since the beginning of the war, Ukrainians have been provided with substantial and practical assistance by freight forwarders' associations from Turkey, Romania, Bulgaria, Poland, and Slovakia, and colleagues from the Hungarian Association have taken an active role.

They helped to solve problems with containers in Turkish and Romanian ports, explained issues related to Turkish customs and admission of Ukrainian road carriers to work in Turkey, the issue of exporting containers from terminals at the port of Constanta in Romania, and paying crazy bills for searching and moving containers at the terminal, issues of customs in Poland and Romania, etc.

Thus, we can identify the leading current trends in the formation and development of the transportation services market:

1. The use of innovative technologies in the transport services market is primarily manifested in new areas of development and implementation of Intelligent Transport Systems: mathematical modeling of traffic and traffic flows (the so-called micro and macro modeling); a unified information system; an electronic system for selecting and indicating a route; a system for assisting drivers.

2. Investment will ensure the development of the industry and access to international markets.

3. Transnational processes "... affect the economies of host countries, accelerate scientific and technological process, internationalization of economic life, attract FDI, provide access to financial resources of TNCs, integration into global economic processes, access to foreign markets" [4].

4. Globalization is manifested in transnational corporations that operate effectively in different parts of the world and actively use new historical conditions to their advantage. Globalization stimulates the strengthening of interconnection, as well as civilizations in general. Globalization ensures the development of a single world market.

5. Digital technologies in the transportation services market have become available to all categories of consumers through mobile phones. They also significantly increase the efficiency of interaction between all types of transport. The interconnectedness of logistics chains deepens the feasibility of forming production and financial flows. The primary sensors provide information about specific cargoes, the peculiarities of their movement, and possible loss of cargoes and provide information in real-time.

6. Training of qualified specialists to ensure the safety of the transport industry during the transition to digital platforms.

Innovative Technologies in Transportation Services

Artificial Intelligence and Machine Learning. AI and machine learning are being actively implemented to optimize transportation processes:

– Traffic Prediction: AI algorithms analyze large volumes of traffic data, weather conditions, and other factors to accurately predict congestion and optimize routes.

– Autonomous Driving: Development of autonomous driving systems for trucks and public transport to increase safety and efficiency of transportation.

– Logistics Optimization: AI helps optimize vehicle loading, route planning, and warehouse inventory management.

Internet of Things (IoT). IoT technologies enable the creation of "smart" transportation systems:

– Vehicle Condition Monitoring: Sensors track the technical condition of vehicles, warning about the need for maintenance.

– Cargo Tracking: IoT devices provide real-time tracking of cargo location and condition.

– "Smart" Stops: Sensor-equipped stops provide passengers with up-to-date information on transport arrivals.

Electric and Autonomous Vehicles. Development of environmentally friendly and autonomous transport:

– Electric Buses: Electric buses should be introduced into public transport systems to reduce emissions.

– Autonomous Trucks: Testing and gradual implementation of autonomous trucks for long-distance transportation.

– Delivery Drones: Use unmanned aerial vehicles for small cargo delivery to hard-to-reach areas.

Mobile Applications and Digital Platforms. Development of digital solutions to improve user experience:

– Multimodal Apps: Creation of applications that allow planning trips using different modes of transport.

– Electronic Payment Systems: Implementation of contactless payment systems in public transport.

– Freight Transportation Platforms: Development of online platforms connecting shippers and carriers.

Safety Innovations. Implementation of technologies to increase transportation safety:

– Driver Assistance Systems: Use cameras and sensors to warn about dangerous situations on the road.

– Biometric Identification: Implementation of facial recognition systems to enhance security in public transport.

– Blockchain for Data Security: Use of blockchain technologies to protect transportation and payment data.

Implementing these innovative technologies will significantly increase the efficiency, safety, and environmental friendliness of transportation services and improve user experience. It is important to note that successful implementation of these innovations requires close cooperation between transportation companies, technology developers, and government agencies.

Conclusions. Despite the great shock that the Ukrainian transport and logistics system experienced at the beginning of the war, it coped with the challenge and ensured transportation of essential goods to and from Ukraine. However, several measures need to be taken to ensure a long-term presence in the European transportation market in the future. It is necessary to introduce solutions to achieve sustainable development goals, build a unified European transport structure, and strengthen a healthy competitive advantage in the market and services with cost-effective resource management of transport and logistics companies. The recent EU strategies and programs adopted are tools for achieving these goals. They should support fair and efficient freight prices, promote multimodality, improve vehicle testing, etc. Among the means to achieve these goals is digitalization, i.e., digital solutions in transport and logistics.

Digitalization is one of the essences of logistics that cannot stop because stopping means no trade and exchange of goods, virtually no consumption, which in the modern world is equal to no life.

List of references

1. Гевко В. І. Інноваційна політика держави як чинник соціально-економічного розвитку. Агросвіт. 2020. № 10. С. 136–143.
2. Гринько Т. В. Проблеми формування концепції інноваційного розвитку промисловості України. URL: http://econindustry.org/arhiv/html/2013/63_16.pdf (дата звернення: 25.06.2022).
3. Козлова А. І. Етапи формування стратегій інноваційного розвитку в країнах ЄС. Бізнес Інформ. 2013. № 4. С. 82–85. URL: www.business-inform.net (дата звернення: 25.06.2022).
4. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія / Аулін В.В. та ін.; за ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.
5. Юрчук Н. П., Вовк В. Ю., Топіна Р. П. Інноваційно-інвестиційна діяльність як основа реалізації концепції сталого розвитку економіки України. Агросвіт. 2019. № 3. С. 53–61.
6. Paul R. Murphy Jr., Donald Michael Wood. Contemporary Logistics. Pearson Education. 2014. 326 p.
7. Sweeney, E. & Waters, D. Global logistics. New directions in supply chain management, 8th Edition. Kogan Page Limited. 2021. 453 p.

8. Waters D., Rinsler S. (2014). Global Logistics (7th ed.). Kogan Page. URL: <https://www.perlego.com/book/1589965/global-logistics-new-directions-in-supply-chain-managementpdf>.
9. Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko. The use of network intralogistics and fulfillment for the functioning of transport and warehouse complexes// Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2023. Col.7(38), Part II
10. Rozhko N. Ya. Posluhy 3PL u mezhakh vidpovidalnoho lohistrychnoho miksu. Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Ser. Ekonomichna. Yurydychna. Lviv, 2020. Vyp. 25. S. 126–133 [in Ukrainian].

References

1. Gevko V. I. (2020) Innovative policy of the state as a factor of socio-economic development. Aghrosvit [Aghrosvit], no. 10, pp. 136–143 [in Ukrainian].
2. Ghrynjko T. V. (2013) Problems of forming the concept of innovative development of Ukrainian industry. Available at: http://econindustry.org/arhiv/html/2013/63_16.pdf (accessed 25 June 2022) [in Ukrainian].
3. Kozlova A. I. (2013) Stages of formation of strategies of innovative development in the EU countries. Biznes Inform, no. 4, pp. 82–85. Available at: www.business-inform.net (accessed 25 June 2022).
4. Theoretical and methodological foundations of the logistics of transport and production systems: a monograph / Aulin V.V. etc.; Kropyvnytskyi: VF Lysenko, 2021. 503 p.
5. Yurchuk N. P., Vovk V. Ju., Topina R. P. (2019) Innovation and investment activities as a basis for implementing the concept of sustainable development of Ukraine's economy. Aghrosvit, no. 3, pp. 53–61.
6. Paul R. Murphy Jr., Donald Michael Wood. Contemporary Logistics. Pearson Education. 2014. 326 p.
7. Sweeney, E. & Waters, D. Global logistics. New directions in supply chain management, 8th Edition. Kogan Page Limited. 2021. 453 p.
8. Waters D., Rinsler S. (2014). Global Logistics (7th ed.). Kogan Page. URL: <https://www.perlego.com/book/1589965/global-logistics-new-directions-in-supply-chain-managementpdf>.
9. Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko. The use of network intralogistics and fulfillment for the functioning of transport and warehouse complexes. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2023. Col.7(38), Part II
10. Rozhko N. Ya. Posluhy 3PL u mezhakh vidpovidalnoho lohistrychnoho miksu. Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Ser. Ekonomichna. Yurydychna. Lviv, 2020. Vyp. 25. S. 126–133 [in Ukrainian].

Н. Я. Рожко, проф., д-р екон. наук, **Ю. Я. Вовк**, доц., канд. техн. наук, **С. С. Рожко**
Тернопільський національний технічний університет ім. І Пулюя, м. Тернопіль, Україна

Формування симбіозу ринку транспортних послуг та інноваційної діяльності на транспорті

Стаття присвячена дослідженню функціонування ринку транспортних послуг в контексті розвитку інноваційної діяльності та побудови організаційно-економічної платформи для його ефективного функціонування. Автори наголошують на необхідності запровадження інновацій та залучення інвестицій у транспортну галузь, оскільки це має безпосередній вплив на економічний стан країни.

У роботі детально розглянуто основні чинники формування ринку транспортних послуг, серед яких виділено організаційні, економічні, соціально-культурні, політичні, управлінські, військові, інфраструктурні та ресурсні фактори. Особлива увага приділяється аналізу сучасного стану транспортного ринку України в умовах воєнного часу, висвітлюються проблеми та виклики, з якими стикається галузь.

Автори визначають ключові тенденції формування та розвитку ринку транспортних послуг, серед яких: впровадження інноваційних технологій, зокрема інтелектуальних транспортних систем; залучення інвестицій для розвитку галузі та виходу на міжнародні ринки; посилення транснаціональних процесів; глобалізація ринку; широке застосування цифрових технологій; підготовка кваліфікованих фахівців для забезпечення безпеки транспортної галузі в умовах переходу на цифрові платформи.

У статті наголошується на важливості адаптації українського транспортного сектору до нових реалій, зокрема, переорієнтації на сухопутні маршрути через європейські країни. Автори підкреслюють необхідність впровадження рішень, які сприятимуть досягненню цілей сталого розвитку, створенню єдиної європейської транспортної системи та посиленню конкурентних переваг українських перевізників на міжнародному ринку.

Дослідження акцентує увагу на ролі діджиталізації як ключового інструменту для досягнення поставлених цілей. Зазначається, що цифрові рішення в транспорті та логістиці є невід'ємною частиною сучасного розвитку галузі та запорукою ефективного товарообміну.

ринок транспортних послуг, транспортна система, інновації, інноваційна діяльність, інвестиції, технічний прогрес, діджиталізація

Одержано (Received) 21.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

О. О. Холодова¹, доц., канд. техн. наук, О. С. Левченко¹, М. О. Бугайова¹, А. О. Боцман²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

²Харківський університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

e-mail: olgakholodova280781@gmail.com

Оптимізація руху міського трамвайного транспорту для підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі

Досліджено вплив міського трамвайного транспорту на дорожній рух у м. Харків. Доведено, що за кордоном активно впроваджуються інтелектуальні системи управління та технології V2V і V2I, тоді як в Україні обмежуються збором статистики, системні зміни майже не впроваджуються, а демонтаж трамвайних колій суперечить міжнародному досвіду. Моделювання показало, що перенесення трамвайної колії на окреме полотно з регулюванням світлофорів знижує конфліктні точки, скорочує затримки, підвищує швидкість руху та мінімізує зупинки. Вирішальним фактором стало правильне місце перенесення колій. Результати можуть сприяти оптимізації трамвайної інфраструктури, підвищенню доступності та ефективності громадського транспорту.

трамвайний рух, транспортний засіб, вулично-дорожня мережа, організація дорожнього руху, ефективність, аварійність, безпека, транспортний потік, дорожньо-транспортна пригода

Постановка проблеми. Небезпека дорожнього руху не обмежується лише аваріями. На дорогах часто виникають конфліктні ситуації між учасниками руху, що можуть бути спричинені різними поведінковими реакціями: стресом, агресією, провокаціями та, як результат, втратою контролю. Найбільша кількість транспортних конфліктів спостерігається у великих містах, де є висока інтенсивність руху.

Одним з головних критеріїв ефективної роботи дорожньої мережі є забезпечення безпечного і безконфліктного співіснування всіх учасників руху в обмеженому просторі. Питання безпеки дорожнього руху особливо актуальні в Україні, де офіційна статистика патрульної поліції свідчить про тенденцію до щорічного погіршення ситуації на дорогах. Найбільшу загрозу безпеці та пропускну спроможності (ПС) дорожнього руху створюють перехрестя, зокрема місця злиття та перетину транспортних потоків (ТП), де змінюється напрямок руху. Традиційне світлофорне регулювання вже не здатне забезпечити належний рівень безпеки та ПС. Тому виникає потреба в перегляді підходів до планування дорожньої мережі, впровадженні інтелектуальних транспортних систем (ITS) та інших сучасних методів організації дорожнього руху (ОДР) [1].

В Україні значна кількість наукових досліджень та практичних заходів спрямована на удосконалення вулично-дорожньої мережі (ВДМ), зокрема на покращення транспортних розв'язок, організацію світлофорного регулювання та впровадження координованого руху. Активно розробляються концепції адаптивного управління дорожнім рухом, оптимізації роботи світлофорних об'єктів та інтеграції ITS у міську інфраструктуру. Проте питання взаємодії трамвайного транспорту з іншими учасниками дорожнього руху залишається малодослідженим і фактично не регулюється на системному рівні.

На відміну від країн із розвиненою трамвайною інфраструктурою, в Україні майже не застосовуються заходи з підвищення безпеки, спрямовані на зниження конфліктних ситуацій між трамваями та автомобілями. Аналіз зарубіжного досвіду показує,

що ефективними рішеннями є закриття прорізів у роздільних смугах, розділення потоків транспорту у просторі (наприклад, шляхом будівництва мостових розв'язок) або у часі (повне сигналізоване регулювання руху та фізичні бар'єри). Також важливим є контроль швидкості трамваїв у критичних зонах для зменшення кінетичної енергії при можливому зіткненні.

Таким чином, для покращення безпеки руху в Україні необхідне комплексне вивчення впливу трамвайного транспорту на ефективність функціонування елементів ВДМ, зокрема, аварійність і розробка ефективних заходів його інтеграції у транспортну систему міст. Вивчення світового досвіду та впровадження сучасних підходів дозволить не лише зменшити кількість ДТП, але й підвищити ефективність функціонування громадського транспорту загалом.

Проблеми руху трамваїв у м. Харків є актуальними через складну дорожню мережу, високу інтенсивність руху та застарілу інфраструктуру. Однією з головних проблем є конфліктні ситуації між трамваями та автомобілями, особливо на перехрестях та в місцях розворотів через трамвайні колії. Часто водії не враховують особливості руху трамваїв, що призводить до аварійних ситуацій. Водночас у м. Харків вже реалізуються певні заходи для покращення дорожнього руху та підвищення безпеки трамвайного транспорту. Наприклад, модернізація трамвайних колій, впровадження світлофорного регулювання на проблемних ділянках та оновлення рухомого складу дозволяють зменшити кількість аварій та підвищити ефективність роботи трамваїв. Досвід міста може бути корисним для інших міст України, оскільки демонструє можливості інтеграції трамвайного транспорту в сучасну систему міського руху з урахуванням безпеки та комфорту пасажирів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. По-перше, слід згадати, що рух транспортних засобів (ТЗ) на ВДМ створюється траєкторіями, які перетинаються через потребу учасників дорожнього руху виконувати обгони, перестроювання, повороти та розвороти. За наявності трамвайної колії посередині проїжджої частини водії повинні дотримуватись вимог правил дорожнього руху (ПДР) щодо пропуску рейкових ТЗ [2]. Недотримання вищеперелічених вимог безпеки руху утворює загрозу виникнення певних транспортних конфліктів міського електричного транспорту (трамвая) з іншими учасниками під час руху перегонами, серед яких в роботах [3,4] виділено такі основні типи конфліктів: конфлікти під час руху (попутне зіткнення з ТЗ через раптове гальмування, поперечні зіткнення при спробах в'їзду на колію перед трамваем, небезпека обгону трамвая та зіткнення із зустрічним рухом); конфлікти під час зміни напрямку руху трамвая; конфлікти в зонах зупинок (затримки через скупчення транспорту на світлофорі, що перешкоджає безпечній посадці-висадці пасажирів, блокування посадкової зони іншими ТЗ, небезпека для пасажирів через невиконання водіями ПДР щодо зупинки біля трамвая); конфлікти на відокремлених трамвайних коліях (затримки через автобуси, що блокують рух трамвая, перехрещення посадкових зон трамвая та автобусів, що створює незручності для пасажирів). В роботах автором зазначається, що оптимальним рішенням для зменшення конфліктів є відокремлення трамвайних колій, вдосконалення світлофорного регулювання та впровадження інтелектуальних транспортних систем. Правила влаштування трамвайних колій передбачено в ДБН В.2.3-5:2018 та ДБН Б.2.2-12:2019.

Важливим при вивченні питань впливу громадського електротранспорту є його зупинки, які відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху, ПС транспортної мережі та комфорту пасажирів. Їх розташування повинно враховувати баланс між зручністю пересадки та мінімізацією затримок у русі громадського транспорту, що є особливо важливим у вузлах інтенсивного транспортного та пішохідного руху, таких як перехрестя магістральних вулиць. Основними критеріями

вибору місць для облаштування зупинок є: безпека пасажирів на всіх етапах пересування, включаючи посадку та висадку; мінімальний вплив на основні ТП з урахуванням конфліктних зон; зручний доступ до ключових об'єктів міської інфраструктури. Оптимальне розташування зупинок визначається на основі комплексного аналізу пішохідних потоків, маршрутів громадського транспорту та розташування об'єктів тяжіння пасажирів. Дослідження свідчать, що надмірно короткі інтервали між зупинками трамваїв (100–200 м) [5] спричиняють значні затримки руху, тому рекомендується їх об'єднання або збільшення відстані між ними. Для забезпечення пріоритетного руху громадського транспорту необхідно впроваджувати наступні заходи: дотримання ПДР та державних стандартів щодо ОДР; оптимізація світлофорного регулювання для мінімізації затримок; обмеження руху іншого транспорту на маршрутах МПТ; створення виділених смуг. Збалансоване планування та розташування зупинок сприятиме підвищенню безпеки, ефективності та комфорту пересування пасажирів у міському середовищі. При цьому потрібно розуміти, що пріоритетний рух трамваїв можна забезпечити без світлофорного регулювання – керованими знаками та табло, а із світлофорним регулюванням – автоматичною активацією сигналів через детектори, що ідентифікують трамвай (для цього застосовують індуктивні контури, радарні та відеодетектори, транспондери) [3].

Отже, аналіз вітчизняної літератури дозволяє виділити ключові проблеми організації руху громадського електротранспорту, зокрема трамваїв, та визначити основні напрями для їх оптимізації. Водночас вітчизняний досвід має певні обмеження, пов'язані з технічними можливостями та рівнем розвитку транспортної інфраструктури. Для отримання комплекснішого бачення та впровадження передових практик доцільним є звернення до закордонних джерел. Аналіз світового досвіду дозволить ознайомитися з інноваційними підходами до організації міського електротранспорту, методами мінімізації конфліктів у ТП і забезпечення пріоритетного руху трамваїв. Це сприятиме формуванню ефективних рішень, адаптованих до умов українських міст.

Дослідження найбільшої у світі компанії-оператора трамвайної системи Yarra Trams [6] показують, що ДТП між трамваями та автомобілями, особливо під час виконання розворотів через колії, хоч і не є частими, проте спричиняють значні травми та негативно впливають на ефективність роботи трамвайного транспорту. Основні причини таких ДТП включають: невірну оцінку безпечного інтервалу між автомобілем та трамваем; обмежену видимість трамваїв; водійську неухважність та порушення ПДР. Щоб зменшити кількість таких ДТП, необхідно впроваджувати комплексні заходи, які поєднують: закриття прорізів у роздільних смугах або створення безпечних альтернативних маршрутів; розділення потоків транспорту у просторі або часі; зниження швидкості трамваїв та контрольовані розвороти. Важливо зазначити, що в контексті концепції "Безпечна система" (Safe System) фокус має зміщуватися з покладання провини на створення умов, що мінімізують ймовірність серйозних травм. Оскільки чим нижча швидкість підходу трамвая, тим коротший його гальмівний шлях і менша енергія удару, перегляд швидкісного режиму є одним із ключових інструментів підвищення безпеки. Матеріал даної статті може бути нам в нагоді для порівняння міжнародного та вітчизняного досвіду, а також формування обґрунтованих пропозицій щодо підвищення ефективності міського електротранспорту.

В більш свіжих дослідженнях Yarra Trams [7] для зменшення кількості ДТП випробувала систему V2V-комунікації (vehicle-to-vehicle), яка передбачає оповіщення водіїв про наближення трамваїв та пасажирів. Результати показали значні переваги для безпеки дорожнього руху та урбаністичного середовища. Як зазначено в статті у майбутньому планується масштабування системи з використанням штучного інтелекту та сенсорних технологій. Для нас ці дослідження можуть бути корисними в плані:

підвищення безпеки, оскільки використання V2V та V2I-технологій для оповіщення водіїв про трамваї дозволить знизити кількість ДТП у містах; зменшення затримок через ДТП, що сприятиме підвищенню доступності наземного електротранспорту; запозичення прикладу розвитку транспортних інфраструктур та впровадження інтелектуальних систем у міському русі.

Надзвичайно цінним є для нас дослідження [8], в якому пропонується використання системи пріоритету сигналів для громадського транспорту (Transit Signal Priority, TSP) та колаборативної структури керування для оптимізації руху трамваїв та підключених ТЗ (Connected Vehicles, CV) на перехрестях. Використання генетичного алгоритму дозволяє налаштовувати тривалість фаз сигналів, зменшувати затримки, покращувати комфорт пасажирів, скорочувати час подорожі та знижувати енергоспоживання. У контексті нашого дослідження запропоновані системи дозволяють мінімізувати затримки для трамваїв на перехрестях та створювати більш передбачуваний графік руху, технології V2V забезпечують ефективну координацію трамваїв та автомобілів, що може знизити конфлікти та підвищити ПС міських доріг, зменшення енергоспоживання та заторів сприяє сталому розвитку міської транспортної мережі, а оптимізація сигналів та маршруту позитивно впливає на комфорт пересування громадським транспортом. Ці підходи можуть бути адаптовані для українських міст, що стикаються з аналогічними проблемами щодо руху наземного електротранспорту та автомобілів на спільних ділянках доріг.

Дослідження [9] аналізує вплив управління трамваями на ПС руху та поведінку водіїв автомобілів на перехрестях. Методологія включає математичне моделювання та опитування водіїв. У роботі виділено три ключові етапи: визначення оптимальної кількості трамваїв для задоволення реального попиту; оцінка того, як надмірна кількість трамваїв блокує інші ТЗ та знижує ПС на перехрестях; вивчення думок автомобілістів щодо причин заторів і впливу цих факторів на їхню поведінку. У висновках авторами зазначено, що управління трамвайним рухом є неефективним через розрив між фактичною потребою у трамваях і реальною кількістю на маршрутах. Велика кількість трамваїв на маршрутах спричиняє затори та ускладнює роботу світлофорів на перехрестях. Більше 75% водіїв постійно відчують стрес через ці проблеми, що погіршує їхню поведінку на дорогах. Для нас з цієї статті корисним може бути визначення раціональної кількості трамваїв для уникнення заторів; розробка рішень для покращення управління перехрестями, де рухаються трамваї; врахування психологічного аспекту дорожніх заторів при плануванні транспортної інфраструктури; запозичення ідей щодо удосконалення трамвайного менеджменту та зниження негативного впливу на дорожній рух у містах України.

В дослідженні [10] авторами запропонований новий підхід до оптимізації міського електротранспорту, здійснений аналіз його впливу на ТП та надана методика оцінки критичних ділянок трамвайної мережі. Стохастичний підхід до моделювання може бути застосований для аналізу ефективності дорожнього руху з урахуванням міського електротранспорту.

Стаття [11] пропонує мікроскопічну модель трамвайної системи, інтегровану з моделюванням дорожнього руху. Вона враховує взаємодію між сигналами трамваїв і світлофорами загального дорожнього руху. Модель складається з шести модулів: пасажирського, транспортного, обладнання трамвая, дорожнього руху, взаємодії та продуктивності. Для перевірки її достовірності проводиться порівняння реальних та змодельованих даних, включаючи час подорожі та середній час очікування пасажирів. Результати досліджень в статті можуть допомогти оцінити, як міський електротранспорт впливає на загальну ефективність дорожнього руху, оскільки містять методику аналізу взаємодії трамвайних маршрутів і світлофорних циклів, що може

бути корисним для оптимізації ТП у містах. Також запропонований підхід до координації сигналів дозволяє розробляти стратегії "зеленої хвилі" для трамваїв, що може підвищити швидкість та регулярність їхнього руху.

В роботі [12] запропонована мікромодель трамвайного руху, яка враховує унікальні параметри трамваїв (форму, місткість) для точного транспортного моделювання. Наявні моделі більше орієнтовані на перехрестя та автомобільні смуги, що ускладнює аналіз трамвайного руху. Запропонована модель поєднує теорію ПС автомобілів із підходами польських залізниць, що забезпечує сумісність із моделями вуличного та залізничного транспорту. Це також дозволяє застосовувати її для проміжних систем, таких як виділені смуги для автобусів або трамвайно-залізничні гібриди. Результати цього дослідження можуть бути корисними при розробці моделей трамвайного руху, які точніше відображають його особливості, а також для аналізу взаємодії трамваїв із загальним трафіком, оптимізації ПС та адаптації моделювання до специфіки конкретного міста.

Цікавою є робота [13], в якій представлені математичні моделі та результати дослідження перехрестя на багатосмуговій магістралі у великому місті Польщі. Автори виявили взаємозв'язок між швидкістю автомобілів і наявністю трамвайних колій, що важливо для визначення реальної ПС міських перехресть. Також розглянуто вплив трамвайних колій на зміну швидкості автомобілів та рівень шуму. Отримані результати можуть бути використані для оновлення методів оцінки ПС перехресть у Польщі. Ця стаття може бути корисною при оцінці впливу трамвайних колій на швидкість руху автомобілів і ПС доріг. Вона також містить дані про шумове забруднення, що може бути корисним при аналізі екологічного впливу трамвайної інфраструктури. Дослідження може бути застосоване при плануванні та організації руху на міських перехрестях.

Авторами роботи [14] аналізується безпека пасажирів під час посадки та висадки з трамваїв на зупинках, які відділені від колій проїжджою частиною. Це створює ризики для всіх пасажирів, особливо для людей з обмеженими можливостями. Дослідження включає класифікацію трамвайних зупинок за кількістю смуг руху, які пасажирам доводиться переходити, а також огляд літератури та пілотне дослідження на трамвайній мережі Метрополії GZM у Польщі для виявлення конфліктних взаємодій між пасажиром та водіями. Стаття містить конкретні приклади таких ситуацій, методику аналізу ризиків на трамвайних зупинках та пропозиції щодо їх зниження, що може бути корисним для оцінки впливу трамвайного транспорту на безпеку дорожнього руху та взаємодію між пасажиром і автомобілістами.

Аналіз літератури демонструє, що за кордоном дослідження трамвайного руху давно вийшли за межі простої фіксації ДТП чи конфліктних ситуацій. Там активно впроваджують інтелектуальні системи управління трафіком, оптимізацію світлофорних фаз, пріоритет трамваїв, технології V2V та V2I, а також моделюють рух для підвищення безпеки й ефективності транспорту. В Україні ж ми поки що здебільшого лише збираємо статистику, але реальних системних змін майже не впроваджуємо. Більше того, рішення часто приймаються в протилежному напрямку — замість розвитку міського електротранспорту відбувається демонтаж трамвайних колій під приводом «підвищення ПС». Такий підхід не лише суперечить міжнародному досвіду, а й позбавляє міста екологічного, ефективного та прогнозованого виду транспорту. Очевидно, що настав час переходити від пасивного аналізу проблем до активного застосування сучасних транспортних рішень.

Постановка завдання. У статті запропоновано дослідити вплив різних варіантів розміщення трамвайних колій на параметри руху ТП та рівень аварійності, поєднуючи ці зміни з сучасними методами ОДР. Метою є визначення оптимального сценарію, який

дозволить підвищити ПС, мінімізувати конфлікти між видами транспорту та покращити безпеку на досліджуваній ділянці вулиці.

Виклад основного матеріалу.

Для дослідження нами обрана ділянка вул. Полтавський Шлях від вул. Петра Болбочана до вул. Озерянської в м. Харків загальною протяжністю 443 м (див. рис. 1). Відповідно до Генерального плану міста Харкова вул. Полтавський Шлях є магістральною вулицею загальноміського значення регульованого руху. Вздовж магістралі пролягають трамвайні колії. На ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Озерянській до вул. Болбочана трамвайні колії розташовані на проїзній частині, на перехресті вул. Полтавський Шлях - вул. Болбочана трамвайні колії переходять на відокремлене трамвайне полотно.



Рисунок 1 – Схема ділянки по вул. Полтавський шлях, що досліджується

Джерело: розроблено авторами

На ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Озерянській до вул. Болбочана існує ряд транспортних проблем:

1. Висока потенційна небезпека зіткнення ТЗ пов'язана з тим, що ТЗ, що рухаються у бік центру при повороті ліворуч на вул. Озерянській на нерегульованому перехресті вимушені довго чекати розрив в щільному потоці автомобілів, які рухаються з центру в напрямку вул. Болбочана, і деякі автомобілісти порушують правила дорожнього руху і не пропускають зустрічний потік, чим створюють аварійну ситуацію (див. рис. 2, рис.3).

2. В місці повороту на вул. Озерянську автомобілі займають смугу попутного руху на трамвайній колії, щоб здійснити поворот ліворуч. Дуже часто виникає ситуація, коли автомобілі займають смугу зустрічного руху на трамвайній колії, що перешкоджає руху трамваю, і трамвай змушений зупинитися. Але на цій ділянці існує ухил, який небезпечний для стоянки трамваю. І трамвай може відкотитися назад, що є дуже небезпечним (див. рис. 4).



Рисунок 2 – Завантаженість ділянки вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська о 08:45
Джерело: розроблено авторами



Рисунок 3 – Створення аварійної ситуації при повороті ліворуч на нерегульованому перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська
Джерело: розроблено авторами



Рисунок 4 – Автомобілі займають смугу зустрічного руху на трамвайній колії на перехресті вул. Полтавський Шлях - вул. Озерянська
Джерело: розроблено авторами

3. На перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана існує так зване «вузьке місце», коли трамвайна колія переходить на відокремлене полотно. Геометрія перехрестя складна, потік дуже щільний, дорожнє полотно знаходиться в незадовільному стані, що приводить до заторових і аварійних ситуацій (див. рис. 5).



Рисунок 5 – Завантаженість перехрестя вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана
Джерело: розроблено авторами

4. На вулиці Полтавський Шлях в межах дослідження розташовані автобусна та трамвайна зупинки. Автобусні зупинки не облаштовані заїзними кишенями та відсутні павільйони. Трамвайні зупинки розташовані посередині проїзної частини одна проти іншої, та не мають посадкові майданчики. Це призводить не тільки до ризику виникнення аварій, а також до транспортних заторів та затримок (рис. 6).

Для розв'язання виявлених проблем пропонується:

1. Впровадити світлофорне регулювання на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (див. рис.7).



Рисунок 6 – Розташування автобусної та трамвайної зупинок на ділянці вул. Полтавський Шлях між вулицями Кандаурова и Болбочана

Джерело: розроблено авторами

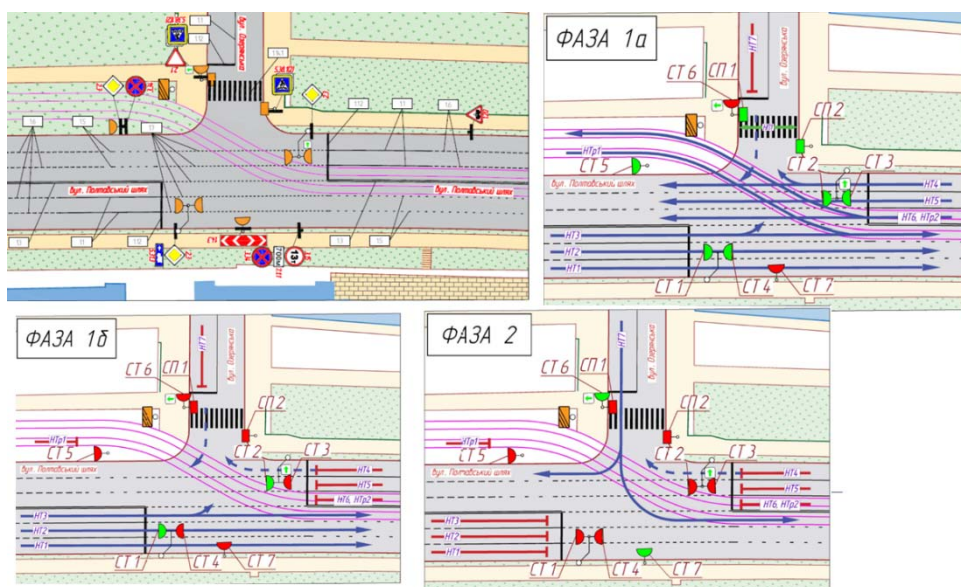


Рисунок 7 – Запропоновані схеми розташування технічних засобів регулювання руху та пофазного роз'їзду

Джерело: розроблено авторами

2. Перенести трамвайні колії з проїзної частині до відокремленого полотна з перехрестя вул. Полтавський Шлях – вул. Болбочана на інше за двома варіантами: на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (див. рис. 8) та на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова (рис. 9).

3. Перенести трамвайну зупинку на відокремлене трамвайне полотно.

4. Налаштувати координований режим роботи між новим світлофорним об'єктом (вул. Полтавський шлях –вул. Озерянська) та двома існуючими (вул. Полтавський шлях –вул. Кандаурова та вул. Полтавський шлях –вул. Болбочана) для

режиму «Зеленої хвилі» (рис. 10).

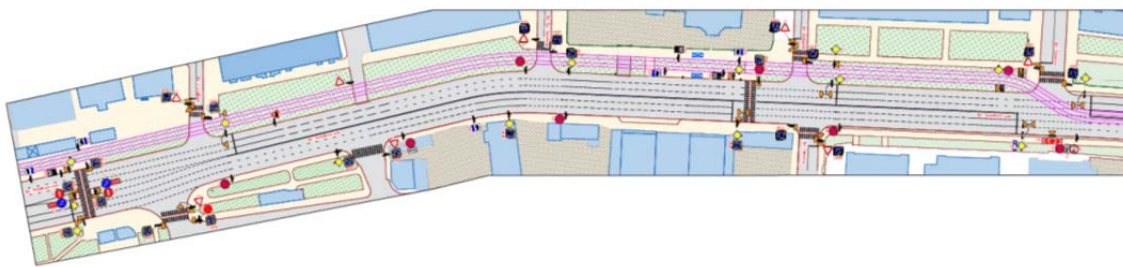


Рисунок 8 – Варіант перенесення трамвайних колій з проїзної частина на окреме трамвайне полотно на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 9 – Варіант перенесення трамвайних колій з проїзної частина на окреме трамвайне полотно на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова

Джерело: розроблено авторами

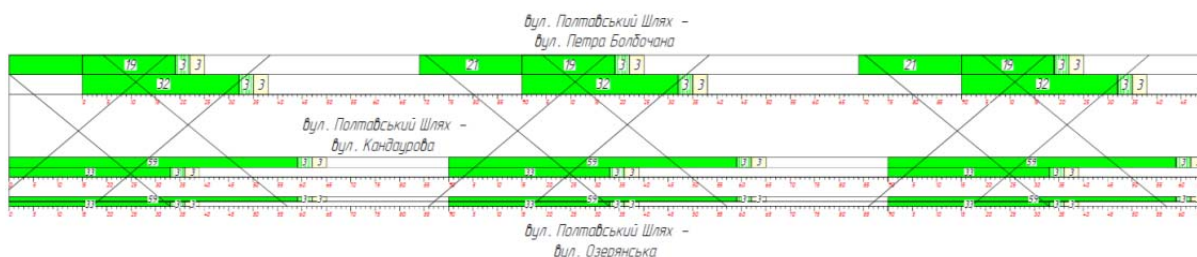


Рисунок 10 – Координація світлофорних об'єктів

Джерело: розроблено авторами

Для оцінки запропонованих рішень виконано імітаційне моделювання руху на ділянці вул. Полтавський Шлях від вул. Петра Болбочана до вул. Озерянської в м. Харків в програмному забезпеченні PTV Vissim при трьох варіантах – існуючому та двома запропонованими з перенесенням трамвайної колії (рис. 11).

Отримані результати свідчать про позитивний вплив на безпеку руху від реалізації запропонованих варіантів. Перший варіант має більше зниження конфліктних точок, ніж другий. Очікувана загальна кількість зниження конфліктних точок в порівнянні з базовим варіантом (див. табл. 1). Стосовно інших показників, то аналіз моделей показав суттєве поліпшення, для першого варіанту (див. табл. 2). За варіантом 1 час затримки зменшиться на 11%, кількість зупинок зменшиться на 1%, швидкість руху збільшиться на 6%. Для варіанту 2 час затримки збільшився на 4%, кількість зупинок на 12% та швидкість руху зменшиться на 2%. Час поїздки за найбільш завантаженим напрямком в центр по вул. Полтавський Шлях зменшиться на 2% при 1 варіанті і збільшиться на 2% при другому варіанті.

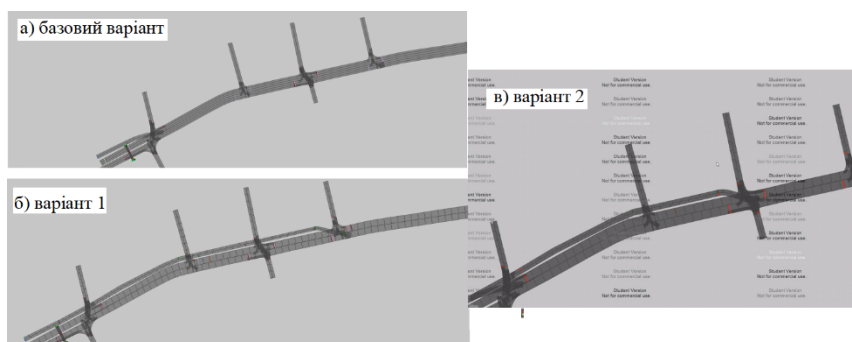


Рисунок 11– Зображення варіантів моделювання

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Результати моделювання щодо безпеки руху

Тип конфлікту	Базовий варіант	Варіант 1	Варіант 2
перетинання	197	58	139
злиття	221	114	107
відхилення	57	31	26
загалом	475	203	272

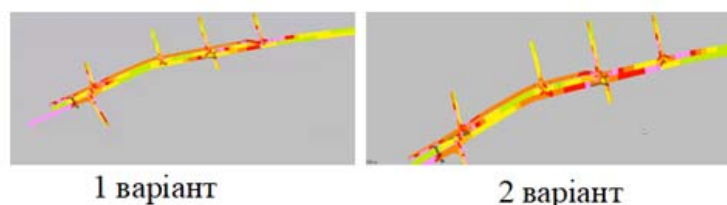
Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Результати моделювання

Показники	Базовий варіант	Варіант 1	Ефект в %	Варіант 2	Ефект в %
Середній час затримки ТЗ, с	55,95	50,41	11%	58,50	4%
Середня кількість зупинок ТЗ	1,70	1,68	1%	1,93	12%
Середня швидкість ТЗ, км/год	22,02	23,35	6%	21,52	2%
Час поїздки в бік центру, с	96,6	94,58	2%	98,75	2%
Час поїздки з центру, с	88,01	86,31	2%	96,13	8%

Джерело: розроблено авторами

Як бачимо на теплових картах зміни швидкості руху (див. рис. 12), запропонований 1 варіант сприяє підтримці вищих та стабільніших швидкостей руху транспортного потоку на ділянках магістралі ніж варіант 2.



Кольорова схема епюр відрізків

Атрибут: Швидкість (км/год)

≤ 10
 ≤ 20
 ≤ 30
 ≤ 40
 ≤ 50
 ≤ 60
 ≤ 80
 ≤ MAX

Рисунок 11 – Теплова карта зміни швидкості руху ТП на мережі за варіантами

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Результати моделювання показали, що перенесення трамвайної колії з проїзної частини на окреме трамвайне полотно у поєднанні зі світлофорним регулюванням на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Озерянська (варіант 1) в м. Харків значно покращує безпеку руху, зменшує транспортні затримки та сприяє стабільнішій швидкості руху. Порівняно з базовим сценарієм, цей варіант забезпечує суттєве зниження конфліктних точок, на 11% зменшує час затримки, підвищує швидкість руху на 6% та мінімізує кількість зупинок. Водночас варіант 2 (перенесення на перехресті вул. Полтавський Шлях – вул. Кандаурова) виявився менш ефективним, оскільки призводить до збільшення затримок та зниження швидкості. Отже, вирішальним фактором стало саме оптимальне місце перенесення колій – якщо це зроблено завчасно, ТП мають більше простору для розділення, і конфліктні точки зменшуються.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації трамвайної інфраструктури в інших містах, що мають подібні проблеми з інтеграцією електротранспорту в загальний дорожній рух. Це може сприяти покращенню транспортної доступності, зниженню аварійності та підвищенню ефективності роботи громадського транспорту.

Список літератури

1. Ключев С.О., Сігонін А.С., Цимбал С.В. Развитие интеллектуальных транспортных систем. *ВМТ*, 2023, вып. 18, вып. 2, с. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-80-86>
2. Правила дорожнього руху 2025: веб-сайт. URL: <https://vodiy.ua/pdr/> (дата звернення: 24.01.2025).
3. Ройко Ю.Я. (2017) Аналіз впливу трамваїв на безпеку руху. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2017, № 866. С. 225-229. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_41
4. Кульбашна Н. І. Зупиночний пункт як об'єкт дослідження роботи МЕТ в нових ринкових умовах *Сталій розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 жовтня 2009 р. Харків: ХНАМГ, 2009. С.107–109.
5. Павлова І., Грабовець В., Дубицький О., Онищук В. Аналіз роботи маршрутного транспорту в зоні зупиночного пункту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2019, 2(13), 139-145. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.97>.
6. Nimmi Candappa, Bruce Corben and Jeremy Yuen. Addressing the Conflict Potential between Motor Vehicles and Trams at Cut-through Locations. *Monash University Accident Research Centre*. 2013. Report 317. 47 p.
7. Improving the future of road safety in Australia with Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication Posted. Urban mobility, Passenger experience, Australia. 2022. URL: <https://innovation.keolis.com/en/projects-news-insights/improving-the-future-of-road-safety-in-australia-with-vehicle-to-vehicle-v2v-communication/>
8. Louati, A., Kariri, E. Enhancing Intersection Performance for Tram and Connected Vehicles through a Collaborative Optimization. *Sustainability*, 2023, 15(12), 9231. <https://doi.org/10.3390/su15129231>
9. Mouloud Khelf, Salim Boukebbab, Neila Bhourri. The Effect of Tram Management on Road Traffic Fluidity and its Influence on Drivers Behaviors at a Critical Junction in Algeria. *Transport Problems = Problemy Transportu*, 2023, 18 (2), pp.31-42. [ff10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f](https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f)
10. da Silva, L.D., Lollini, P., Mongelli, D. *et al.* A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *J Braz Comput Soc* 27, 2, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>
11. Zhao X, Li Y, Xu S, Zhai H. Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation. *SIMULATION*. 2018;94(1):77-90. doi:10.1177/0037549717734420
12. Jeremi Rychlewski. Modelling of tram traffic quality. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 2004. URL: www.researchgate.net/publication/290698427_Modelling_of_tram_traffic_quality.
13. A. Sobota, R. Zochowska, E. Szczepański, and P. Gołda, "The influence of tram tracks on car vehicle speed and noise emission at four-approach intersections located on multilane arteries in cities," *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2453–2468, Sep. 2018, <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20087>
14. Soczówka, P., & Zochowska, R. Interactions between tram passengers and road vehicles at tram stops - a pilot study. *Transactions on Transport Sciences*, 2020, 11(2), 64-76. doi: 10.5507/tots.2020.007

References

1. Kliuiev, S.O., Sihonin, A.Ie., & Tsymbal S.V. (2023) Rozvytok intelektualnykh transportnykh system. *VMT*, vyp. 18, vyp. 2, P. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-80-86> [in Ukrainian].
2. Pravila dorozhnoho rukhu 2025: veb-sait URL: <https://vodiy.ua/pdr/> [in Ukrainian].
3. Roiko, Yu.Ia. (2017) Analiz vplyvu tramvaiv na bezpeku rukhu. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnikha"*. Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i prykladiv. № 866. P. 225-229. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_41 [in Ukrainian].

4. Kulbashna, N.I. (2009) Zupunochnui punkt yak obekt doslidzennia robotu MET v novuh runkovuh ymovah. *Elektrichnui transport – prespektivu rozvutky ta kadrove zabezpechennia: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp.107-109). Kharkiv:KhNUMG [in Ukrainian].
5. Pavlova, I., Hrabovets, V., Dubytskyi, O., & Onyshchuk, V. (2019). Analiz roboty marshrutnoho transportu v zoni zupunochnoho punktu. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(13), 139-145. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.97> [in Ukrainian].
6. Nimmi Candappa, Bruce Corben and Jeremy Yuen (2013). Addressing the Conflict Potential between Motor Vehicles and Trams at Cut-through Locations. *Monash University Accident Research Centre*. Report 317. 47 p.
7. Improving the future of road safety in Australia with Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication (2022) Posted. Urban mobility, Passenger experience, Australia. 2022. URL: <https://innovation.keolis.com/en/projects-news-insights/improving-the-future-of-road-safety-in-australia-with-vehicle-to-vehicle-v2v-communication/>.
8. Louati, A., & Kariri, E. (2023). Enhancing Intersection Performance for Tram and Connected Vehicles through a Collaborative Optimization. *Sustainability*, 15(12), 9231. <https://doi.org/10.3390/su15129231>.
9. Mouloud Khelf, Salim Boukebbab, Neila Bhourri (2023) The Effect of Tram Management on Road Traffic Fluidity and its Influence on Drivers Behaviors at a Critical Junction in Algeria. *Transport Problems = Problemy Transportu*, 18 (2), pp.31-42. [ff10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f](https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.2.03ff.fhal-04273335f) [in English].
10. da Silva, L.D., Lollini, P., Mongelli, D. et al. (2021) A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *J Braz Comput Soc* 27, 2. doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x.
11. Zhao, X, Li, Y, Xu, S, & Zhai, H. (2018) Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation. *SIMULATION*. 94(1):77-90. [doi:10.1177/0037549717734420](https://doi.org/10.1177/0037549717734420) [in English].
12. Jeremi Rychlewski (2004). Modelling of tram traffic quality. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. URL: www.researchgate.net/publication/290698427_Modelling_of_tram_traffic_quality.
13. Sobota, A., Żochowska, R., Szczepański, E., & Gołda, P. (2018) “The influence of tram tracks on car vehicle speed and noise emission at four-approach intersections located on multilane arteries in cities,” *Journal of Vibroengineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2453–2468, Sep. 2018, <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20087>.
14. Soczówka, P., & Żochowska, R. (2020). Interactions between tram passengers and road vehicles at tram stops - a pilot study. *Transactions on Transport Sciences*, 11(2), 64-76. [doi: 10.5507/tots.2020.007](https://doi.org/10.5507/tots.2020.007).

Olha Kholodova¹, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Olena Levchenko**¹, **Maryna Buhaiova**¹, **Anastasiia Botsman**²

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

²*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*

Optimization of Urban Tram Traffic to Improve the Efficiency of the Street and Road Network

Traffic safety depends not only on the number of road accidents but also on the level of conflict between its participants, especially at intersections and at the junction of traffic flows. One of the key but insufficiently studied aspects is the interaction of tram transport with cars, which directly affects the capacity and safety of the road network. The article analyses the impact of various tramway schemes on the dynamics of traffic flows and accidents, considering modern traffic management methods. The study aims to determine the optimal solution that will increase the efficiency of the transport system, minimize conflicts between modes of transport, and ensure safe traffic conditions in the study area.

The literature analysis shows that tram traffic research abroad includes introducing intelligent control systems, optimizing traffic lights, promoting tram priority, and using V2V and V2I technologies. In Ukraine, however, they are mostly limited to collecting statistics, while systemic changes are hardly implemented, and the dismantling of tram tracks contradicts international experience. To solve the identified problems, it is proposed that traffic lights be introduced at the intersection of Poltavskyi Shlyakh - Ozeryanska Street. The tram tracks should be moved from the carriageway to a separate track from the intersection of Poltavsky Shlyakh - Bolbochan Street to another location, either at the intersection of Poltavsky Shlyakh - Ozeryanska Street or Poltavsky Shlyakh - Kandaurova Street. The tram stop should also be relocated to a separate tram track. Additionally, a coordinated mode of operation between the new traffic light facility (Poltavsky Shlyakh - Ozeryanska Street) and the existing ones (Poltavsky Shlyakh - Kandaurova Street and Poltavsky Shlyakh - Bolbochan Street) is proposed for the ‘green wave’ mode. Traffic modeling using PTV Vissim was conducted on the section of Poltavsky Shlyakh Street from Petra Bolbochan Street to Ozeryanska Street in Kharkiv to evaluate the existing and proposed options.

The modeling results indicate that relocating the tramway to a separate track at the Poltavsky Shlyakh - Ozeryanska intersection (Option 1) in Kharkiv improves traffic safety, reduces delays by 11%, and increases speed by 6%. In contrast, Option 2 (relocation to Poltavskyi Shlyakh - Kandaurova Street) worsens delays and reduces speed. Proper track placement allows smoother traffic flow by reducing conflict points. These findings can inform tram infrastructure optimization in other cities, enhancing accessibility, safety, and public transport efficiency.

tram traffic, vehicle, street and road network, traffic management, efficiency, accident rate, safety, traffic flow, road traffic accident

Одержано (Received) 14.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025

М. Д. Швець, доц., канд. техн. наук, **І. О. Хітров**, доц., канд. техн. наук
*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
Україна*
e-mail: m.d.shvets@nuwm.edu.ua

Інтеграція технологій вантажних робіт і виробничих систем транспорту для підвищення ефективності перевезень

Автори аналізують сучасні підходи до поєднання транспортних та виробничих процесів, що дозволяють зменшити витрати та покращити швидкість виконання операцій. Особлива увага приділяється впровадженню автоматизованих та цифрових технологій, таких як роботизація складських процесів, моніторинг вантажів і управління ланцюгами поставок. Вивчається також роль інформаційних систем, що дозволяють забезпечити безперервну комунікацію між учасниками процесу і оптимізувати логістичні маршрути. Зроблено висновок, що інтеграція виробничих, технологічних і транспортних систем дозволяє знизити час обробки вантажів, зменшити ризики помилок і підвищити точність доставки. Останні досягнення в цій сфері створюють умови для розвитку більш гнучких та адаптованих процесів на транспорті.

автомобільний транспорт, вантажні перевезення, виробнича система, технологія вантажних робіт

Постановка проблеми. Зі зростанням обсягів вантажоперевезень і складністю ланцюгів постачань виникають значні труднощі у збереженні ефективності роботи як вантажних, так і виробничих систем транспорту. Існуючі технології часто не інтегровані між собою, що призводить до втрат часу, підвищення витрат на перевезення і зниження загальної ефективності [1]. Недостатня автоматизація процесів, відсутність єдиної платформи для моніторингу вантажів та недостатня координація між етапами транспортування створюють додаткові ризики та знижують якість обслуговування. Тому виникає нагальна потреба в розробці і впровадженні інтегрованих технологій, які б дозволили знизити ці проблеми, підвищити швидкість і точність перевезень, а також забезпечити оптимальне використання ресурсів на всіх етапах транспортного процесу [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми інтеграції технологій вантажних робіт і виробничих систем транспорту досліджуються на різних рівнях багатьма українськими і світовими науковцями. Досить детально питання ступенів та рівнів комплексної механізації та автоматизації, ланцюгів навантажувально-розвантажувальних робіт досліджено М. А. Полтавцем та О. Д. Омельченком [3]. Також Кучма О. С. [4] дослідив раціоналізацію систем організації комплексної механізації й автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт у вантажних пунктах та формування технологічних схем обробки вантажів при виконанні вантажних робіт з залученням різних видів транспорту. Технологічні аспекти перевезення негабаритних вантажів та важливість значення автоматизації при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт розкриває О. М. Мельник [5]. М. Д. Швець, О. Г. Кірічок та В. А. Познаховський [6] дослідили процес вибору оптимального підходу до виконання навантажувально-розвантажувальних робіт, при якому механізація

буде максимальною з урахуванням конкретних видів вантажів в виробничих системах. З іноземних науковців можна акцентувати увагу на дослідженнях, що проведені Дж. Моніосом [7] щодо оптимізації автоматизації контейнерних терміналів. Король Р. Г. [8] розробив рекомендації щодо оптимізації навантажувально-розвантажувальних робіт при взаємодії різних видів транспорту в транспортних вузлах для підвищення ефективності виробничих систем. Застосування концептуальних моделей при оптимізації перевізного процесу запропонованих Т. Бектасом [9] наголошують на важливості використання інтеграційних процесів у виробничих системах для підвищення швидкості та точності роботи логістичних систем.

Постановка завдання. Зв'язок між впровадженням технологій вантажних робіт і розвитком виробничих систем на транспорті полягає в тому, що сучасні технології дозволяють значно підвищити ефективність і продуктивність обох систем.

Основна мета досліджень полягає у розкритті синергії між вантажними та виробничими системами транспорту, що дозволить оптимізувати логістичні процеси, зменшити час обробки вантажів, підвищити точність доставки і знизити операційні витрати, а також адаптувати існуючі виробничі і транспортні процеси до нових умов інтеграції.

Виклад основного матеріалу. Еволюція виробничих систем, особливо за останні роки, в умовах економічної та соціальної невизначеності, значною мірою вплинула на збільшення транспортного попиту [10]. Це стало результатом низки факторів, серед яких глобалізація торгівлі, що призвела до необхідності доставки товарів «точно в зазначений час», а також вимоги щодо підвищення ефективності використання ресурсів. Крім того, зростаюча потреба в координації та розширенні логістичних мереж постачання і збуту продукції, інтеграція різних видів транспорту для забезпечення більшої гнучкості та швидкості операцій, вимагає від підприємств постійного адаптування як окремих елементів, так і цілих виробничих і транспортних систем [11]. В умовах швидких змін в усіх сферах господарської діяльності, ці адаптаційні процеси особливо важливі для підтримання конкурентоспроможності та ефективного функціонування транспортної і логістичної інфраструктури.

Взаємозв'язок між виробничими, технологічними та транспортними системами являє собою процес інтеграції різноманітних компонентів обох систем з метою досягнення оптимізації загальної ефективності. Така інтеграція дозволяє забезпечити більш скоординовану та злагоджену роботу виробничих і транспортних процесів, що в свою чергу сприяє зниженню витрат і покращенню оперативності. Це можна досягнути різними методами, зокрема через використання єдиних програмних комплексів, які забезпечують злагоджену роботу обох систем, створення мереж для ефективної взаємодії учасників процесу, розвиток спільної інфраструктури для полегшення логістичних операцій, а також шляхом поєднання різних типів систем і технологій, які є складовими частинами виробничих і транспортних процесів. Такий підхід дозволяє знизити ризики, підвищити гнучкість та забезпечити швидке реагування на зміни в умовах ринку.

Виробничі системи на транспорті – це складні комплекси, що включають технічні, технологічні, організаційні та економічні процеси, пов'язані з транспортними перевезеннями [12]. Технічні інновації у вантажних роботах значно впливають на ефективність виробничих систем транспорту, зокрема шляхом оптимізації процесів, зменшення витрат і підвищення швидкості обробки вантажів. Саме навантажувально-розвантажувальні роботи є ключовими операціями цих систем, оскільки вони визначають ефективність транспортного процесу.

Організація і технологія навантажувально-розвантажувальних робіт безпосередньо впливає на ефективність виробничих систем автомобільного транспорту і визначає швидкість обробки вантажів, ступінь використання транспортних засобів, рівень простоїв та загальну продуктивність транспортних підприємств (рис. 1).

Поєднання навантажувально-розвантажувальних робіт з виробничими системами транспорту реалізується через логістичний підхід (вони є невід'ємною частиною логістичних ланцюгів постачання, синхронізують виробничі і складські процеси), автоматизацію та механізацію процесів (використання конвеєрів, кранів, роботизованих систем прискорює виконання робіт, зменшує простої транспорту та підвищує продуктивність виробничої системи), механізму взаємозв'язку з транспортними процесами (час безпосередньо впливає на тривалість вантажних перевезень, а оптимізація цих робіт сприяє зменшенню транспортних витрат), типу виробничої системи та їх взаємодії (дискретні системи як термінали, логістичні центри, потребують швидкодії для уникнення затримок, а безперервні системи – конвеєрні лінії, трубопровідний транспорт, інтегрують у виробничий процес), а також економічну ефективність (раціональна організація робіт знижує експлуатаційні витрати, сприяє ефективному використанню ресурсів, збільшує прибутковість).



Рисунок 1 – Роль технологій вантажних робіт у трансформації виробничих процесів на транспорті

Джерело: розроблено авторами

Зменшення часу простою автомобіля в пунктах відправлення і прийому вантажів досягається не тільки в результаті прискорення виконання навантажувально-розвантажувальних операцій, а також в результаті вдосконалення конструкції автомобіля, покращення дорожніх умов, підвищення майстерності водія, регулювання вуличного руху і інших факторів [6].

Відповідність і ефективність використання різних видів транспортних засобів обумовлюється технологічними схемами механізованого перевантаження вантажів, які розробляються по різних варіантах перевантаження з врахуванням конкретних виробничих систем. Варіантом перевантаження називається закінчене по призначенню переміщення вантажу. В межах кожного варіанту перевантаження може бути декілька варіантів механізації, тому що для перевантаження одного і того ж вантажу можуть використовуватись різні засоби механізації і відповідно їхня продуктивність може суттєво відрізнятись, що в кінцевому випадку призводить до різної продуктивності і ефективності їх використання.

Від того, з якою продуктивністю працюють механізми і за який час вони завантажують (розвантажують) автомобілі залежить тривалість простою автомобілів в навантажувально-розвантажувальних пунктах і ефективність роботи транспортних засобів на маршрутах.

Для виконання функцій по перевантаженню вантажів виробнича система постійно діючих навантажувально-розвантажувальних пунктів повинна включати: складське господарство; вагові пристрої; засоби механізації навантажувально-розвантажувальних робіт, пристосування до них і такелажний реманент; мережу під'їзних колій для руху по складу й під'їзду до вантажно-розвантажувальних постів; службові й побутові приміщення; засоби зв'язку; засоби зовнішнього освітлення для виконання вантажно-розвантажувальних робіт у темний час доби. Всі ці елементи дають змогу дотримуватись графіку виконання робіт в межах конкретної виробничої системи та більш ефективно використовувати її.

Висновки. Таким чином, ефективна організація сприяє підвищенню продуктивності виробничих систем автомобільного транспорту. Використання сучасних технологій (автоматизація, механізація, цифрові системи управління) скорочує простої, мінімізує витрати, підвищує безпеку та забезпечує стабільність логістичних процесів, що дозволяє оптимізувати транспортні потоки, покращити якість обслуговування клієнтів та збільшити економічну ефективність підприємства. Навантажувально-розвантажувальні роботи є не просто окремим етапом, а важливим елементом виробничої системи транспорту, що впливає на її продуктивність і економічність в цілому. Завдяки таким інноваціям виробничі системи транспорту стають більш гнучкими, швидкими і здатними ефективно реагувати на зміни умов ринку та вимоги клієнтів.

Список літератури

1. Бабій М. В., Дзюра В. О., Бабій А. В., Рожко Н. Я., Валяшек В. Б. Обґрунтування оптимальної схеми перевезення насипних вантажів при взаємодії різних видів транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 8(39), ч.ІІ. С. 190–198. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.190-198](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.190-198).
2. Голуб Д. В., Аулін В. В., Біліченко В. В., Замуренко А. С. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2022. Вип. 1(15), С. 44–51. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-44-51>.

3. Полтавець М. А., Омельченко О. Д. Наукові основи комплексної механізації та автоматизації навантажувально-розвантажувальних транспортно-складських робіт при взаємодії з рухомих складом та макрологістичні системи поточних ліній і комплексів. *Наукоємні технології*. 2016. № 3. С. 308–314.
4. Кучма О. С. Рационалізація систем організації комплексної механізації й автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт у пунктах сполучення авіаційного та інших видів транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 35 (74) № 2 2024. С.298–303. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/2_2024/43.pdf.
5. Мельник О. М. Технологічні аспекти перевезення негабаритних вантажів. Транспортно-технологічне забезпечення процесів доставки та обробки негабаритних вантажів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 31 (70), Ч 2. №2. 2020 С.168–174. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/2_2020/part_2/31.pdf
6. Швець М. Д., Кірічок О. Г., Познаховський В. А. Механізація та організація виробничого процесу при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт. «Наукові нотатки». Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»). Луцьк, ЛНТУ 2018. Вип. №62. С. 226–229.
7. Electric vehicle routing problem with single or multiple recharges / T. Erdelic et al. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 217–224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.033>.
8. Korol R.H. Perfection of the process of interaction of various types of transport in the far eastern transport hubs. *Proceeding of the International Science and Technologies*. Springer, Singapore. 2022. Vol. 274. P. 153–162. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8829-4_12.
9. Bektas T. Freight logistics, distribution and transport Concepts. *Freight Transport and Distribution*. 2017. 285 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315173962>
10. Хітров І. О., Швець М. Д. Роль транспорту у виробничих системах. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. №1(20). С. 283–289. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1056>.
11. Хітров І.О. Стратегічні напрями розвитку транспортного підприємства в умовах невизначеності. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Луцьк. 2024. №2 (23). С. 268–275. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1548>
12. Бідняк М. Н., Біліченко В. В. Виробничі системи на транспорті: теорія і практика. Вінниця, Універсум, 2006. 176 с.

References

1. Babii, M., Dzyura, V., Babii, A., Rozhko, N. & Valiashek, V. (2023). Justification of the optimal scheme of bulk cargo transportation during interaction of different types of transport. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 8(39), Part II. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.190-198](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.190-198) [in Ukrainian].
2. Holub, D.V., Aulin, V.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2022). Implementation of system approach in determining the efficiency of functioning of complex regional transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 1(15), 44–51. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-44-51> [in Ukrainian].
3. Poltavets, M. A. & Omelchenko, O. D. (2016). Naukovi osnovy kompleksnoi mekhanizatsii ta avtomatyzatsii navantazhuvально-rozvantazhuvальnykh transportno-skladskykh robit pry vzaiemodii z rukhomym skladom ta makrolohystychni systemy potochnykh liniy i kompleksiv. *Science based technologies*. 3(31), 308–314 [in Ukrainian].
4. Kuchma, O. S. (2024). Rationalization of system for organizing integrated mechanization and automation of loading and unloading operations at air and other transport connection points. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University*. 35(74), Part II, 298–303. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/41> [in Ukrainian].
5. Melnyk, O. M. (2020). Technological aspects of oversized cargo transportation. Technological support of the processed of delivery and handling of oversized cargoes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University*. 31 (70). Part 2, 168–174. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/29> [in Ukrainian].
6. Shvets, M., Poznakhovskiy, V. & Kirichok, O. (2018). Mechanization and organization of the production process in execution loading and unloading works. *Naukovi notatki*. 62, 226–229 [in Ukrainian].
7. Erdelic, T. et al. (2019). Electric vehicle routing problem with single or multiple recharges. *Transportation Research Procedia*. 40, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.033>

8. Korol, R. H. (2022). Perfection of the process of interaction of various types of transport in the far eastern transport hubs. *Proceeding of the International Science and Technologies*. Springer, Singapore. 274, 153-162. https://doi.org/1007/978-981-16-8829-4_12.
9. Bektas, T. (2017). Freight logistics, distribution and transport Concepts. *Freight Transport and Distribution*. 285 p. <https://doi.org/10.1201/9781315173962>.
10. Khitrov, I. & Shvets, M. (2023). The role of transport in production systems. *Advances in mechanical engineering and transport*. 1(20), 283–289. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1056> [in Ukrainian].
11. Khitrov, I. (2024). Strategic directions for the development of a transport enterprise under conditions of uncertainty. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2(23), 268–275. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1548> [in Ukrainian].
12. Bidniak, M. N. & Bilichenko, V. V. (2006). *Vyrobnychi systemy na transporti: teoriia i praktyka*. Vinnytsia, 176 [in Ukrainian].

Mykola Shvets, Assoc. Prof. PhD tech. sci., **Ihor Khitrov**, Assoc. Prof. PhD tech. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine

Integration of Cargo Work Technologies and Transport Production Systems to Increase Transportation Efficiency

Considering the significant role of integration processes in one of the key elements of the country's transport support – the organization of loading and unloading operations for enhancing transportation efficiency – the authors conducted an in-depth analysis of scientific publications by both Ukrainian and foreign researchers.

Rapid changes occurring in all spheres of economic activity, along with the insufficient responsiveness within transport systems, highlight the importance of adaptation processes, especially for maintaining competitiveness and ensuring the efficient functioning of transport and logistics infrastructures. To improve integration, it is necessary to implement unified software systems that ensure the coordinated operation of both production and transport systems, develop networks for effective interaction among process participants, expand shared infrastructure to facilitate logistics operations, and integrate different types of systems and technologies that form essential components of production and transport processes.

Based on existing issues related to the insufficient automation of transport technological processes within production systems, the authors have studied, analyzed, and presented the impact of the organization and technology of loading and unloading operations on production systems. The execution of loading and unloading operations directly affects the economic efficiency of transport systems, mainly through a logistics-based approach, improving the mechanization and automation of cargo processes, which accelerates the execution of these operations.

The suitability and efficiency of using different types of transport vehicles depend on technological schemes of mechanized cargo handling, which are developed according to various transshipment options while considering specific production systems. The productivity of mechanisms and the time required for loading and unloading operations directly impact vehicle downtime at loading and unloading points and, consequently, the efficiency of transport operations on routes.

Thus, loading and unloading operations are a crucial element of the transport production system, directly influencing its productivity and efficiency. Thanks to such innovations, transport production systems become more flexible, faster, and better able to respond effectively to market changes and customer demands.

road transport, cargo transportation, production system, technology of cargo works

Одержано (Received) 12.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.02.2025

ЗМІСТ

ЦНТУ – 155! 3

Комп’ютерні науки

Д. А. Білоус, А. В. Козловський
Загальна модель бази знань інформаційної технології оцінки складності
розробки програмного забезпечення із застосуванням SaaS/PaaS платформ 5

М. М. Злобін, В. М. Базилевич
Підхід на основі даних для збалансування перенавчання та недонавчання
в моделях дерева рішень..... 14

*В. О. Качурівський, А. А. Котовський, Т. А. Лиходід,
Г. М. Качурівська, О. П. Доренський*
Концепція цифрової трансформації моніторингу наукової активності
учасників освітнього процесу в українському ЗВО..... 27

І. А. Котов, Д. В. Швець, Н. О. Карабут
Аналіз еволюції об’єктно-орієнтованої парадигми в патернах мови Java
для мультиплатформних середовищ 37

Ю. І. Підлісний
Шляхи підвищення конфіденційності в мережах інтернету речей..... 46

Комп’ютерна інженерія

М. С. Продеус, А. О. Нічепорук, А. С. Каштальян
Система моніторингу, виявлення, реагування та захисту інформації
на основі honeypot-файлів 56

Прикладна механіка

Д. В. Вахніченко, М. О. Годунко, С. В. Писанка
Дослідження рухових можливостей кінематичних ланок МПС
при формоутворюючих рухах осьовим інструментом 68

І. Б. Гевко, А. Є. Дячун, Т. С. Дубиняк, О. Ю. Стібайло, А. Б. Гупка
Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів
на спіралях шнеків 75

В. В. Дуб, О. Г. Терешкін, В. М. Пазюк
Зниження енергоємності процесу подрібнення м’ясної сировини
на підприємствах ресторанного господарства 84

Д. О. Мітєв, В. М. Кропівний
Методичні основи створення вимірювального комплексу для реєстрації
сигналів акустичної емісії при механічній обробці 92

О. В. Тимошенко, О. С. Мусієнко, Я. В. Демешко
Технологічна пошкоджуваність конструкцій, виготовлених методом 3D-друку 101

Матеріалознавство

- А. А. Азарян, Д. В. Швець, А. А. Трачук, О. В. Швидкий*
Оперативний контроль вмісту заліза в пульпі зливу класифікатора
з використанням гамма-випромінювання 108
- В. М. Гвоздецький, О. Г. Лук`яненко, С. І. Маркович, М. М. Студент,
Х. Р. Задорожна, Н. З. Моцола*
Поверхнева топографія електродугових покриттів з різних композицій
порошкових дротів та її вплив на механізм зносу 115
- О. Є. Марков, Є. С. Музикін, П. С. Музикін*
Формозміна пустотілих поковок по типу гільз у процесі протяжки
без оправки бійками зі скосами 121

Галузеве машинобудування

- І. Б. Гевко, А. Б. Гупка, С. О. Коваль, А. О. Брикса, В. М. Бучинський*
Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання
гвинтових змішувачів 129
- П. М. Луц, І. А. Бабин, В. Б. Говоруха, В. М. Павліченко*
Результати експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора
кормів білково-вітамінного концентрату рослинного походження 139
- М. С. Магопець, В. В. Аулін, А. В. Гриньків*
Вплив елементів ергономіки та мехатроніки на функціонування
системи «оператор – мобільна машина» 148
- Ю. В. Мачок, Д. Ю. Артеменко, В. В. Амосов, Д. І. Петренко*
Обґрунтування пристрою для зменшення тягового опору плуга 158
- Г. В. Теслюк, В. В. Головченко*
Аналіз конструктивних особливостей машин для очищення насіння ріцини 167
- І. В. Шепеленко, А. М. Красота, М. В. Красота*
Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі
з антифрикційним покриттям 179

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

- О. П. Голик, Р. В. Жесан, О. В. Корсіков, О. А. Неруш*
Методика дослідження вольт-амперних характеристик сонячних елементів
в штучних умовах 190
- С. Г. Ковальов*
Оптимізація часу виробництва за допомогою методу навчання
з підкріпленням як частинний випадок підвищення ефективності
автоматизованих виробничих ліній 198

Агроінженерія

- О. Д. Деркач, Д. О. Макаренко, С. П. Дмитрюк, В. Л. Горобець,
О. М. Лівіцький, Д. О. Дяченко*
Охорона праці при експлуатації безпілотних мобільних автономних платформ
в агропромисловому виробництві 206

Автомобільний транспорт

- Д. В. Голуб, В. В. Аулін*
Удосконалення управління мехатронною системою впорскування двигуна
внутрішнього згорання автомобіля 213
- А. М. Зайцев, В. В. Аулін, С. В. Лисенко, В. З. Гудь*
Організація, принципи та система транспортного забезпечення
сільськогосподарських підприємств 223
- А.В. Йовченко*
Розробка пристрою для контролю безпеки руху вантажного транспорту з причепами..... 230
- А. О. Молодан, О. С. Полянський, М. П. Артёмов, О. Ю. Пушкаренко*
Вплив механічних втрат на потужність двигуна колісного транспортного
засобу за умов деактивації циліндрів 236
- С. Ю. Тищенко, А. А. Сергійчук, В. В. Аулін, А. В. Гриньків*
Методи визначення потреб підприємств автосервісу в запасних частинах
та розробка методики їх впливу на загальну працездатність автомобілів 243
- С. В. Філатов, І. С. Водоп'янов*
Вплив температурних напружень, що виникають в циліндро-поршневій групі
при експлуатації автомобілів 258

Транспортні технології

- В. В. Аулін, Д. О. Кульова, В. В. Варваров*
Виявлення, аналіз і прогнозування параметрів ризику безвідмовного навантаження
готової продукції на транспортно-логістичному терміналі підприємства 263
- І. А. Бережняк, Є. Б. Сліпенький, В. О. Дорошук, В. С. Сорока*
Підвищення ефективності складських процесів шляхом моделювання
сервісного центру 272
- М. В. Голотюк, В. О. Дорошук, І. А. Бережняк*
Сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій..... 280
- В. О. Дорошук, І. А. Бережняк, Є. Б. Сліпенький*
Організація дорожнього руху поза межами населених пунктів 287
- Н. Я. Рожко, Ю. Я. Вовк, С. С. Рожко*
Формування симбіозу ринку транспортних послуг та інноваційної діяльності
на транспорті..... 294
- О. О. Холодова, О. С. Левченко, М. О. Бугайова, А. О. Боцман*
Оптимізація руху міського трамвайного транспорту для підвищення
ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі 301
- М. Д. Швець, І. О. Хітров*
Інтеграція технологій вантажних робіт і виробничих систем транспорту
для підвищення ефективності перевезень 313

CONTENT

Central Ukrainian National Technical University – 155! 3

Computer Science

Dmytro Bilous, Andrii Kozlovskiy
Knowledge Representation Model for the Complexity Analysis of the Software
Development using SaaS/PaaS Platforms 5

Mykola Zlobin, Volodymyr Bazylevych
A Data-Driven Approach for Balancing Overfitting and Underfitting
in Decision Tree Models 14

*Volodymyr Kachurivskiy, Anatolii Kotovskiy, Taras Lykhodid,
Hanna Kachurivska, Oleksandr Dorenskiy*
The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity
of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI 27

Ihor Kotov, Dmitriy Shvets, Nadia Karabut
Analyzing the Evolution of Object-Oriented Paradigm in Java Language
Patterns for Multiplatform Environments 37

Yuriy Pidlisnyi
Possible Ways to Improve Privacy in IoT Networks 46

Computer Engineering

Maksym Prodeus, Andrii Nicheporuk, Antonina Kashtalian
Honeypot-Based Information Monitoring, Detection, Response
and Protection System 56

Applied Mechanics

Dmytro Vakhnichenko, Maksym Hodunko, Sergii Pysanka
Research on the motor capabilities of the kinematic links of the machine
with PKM during shaping movements with an axial tool 68

Ivan Hevko, Andrii Diachun, Taras Dubyniak, Oleg Stibailo, Andrii Gupka
Technological Features of the Production of Shredder Knives on Screw Spirals 75

Volodymyr Dub, Oleh Tereshkin, Vadym Paziuk
Reducing the Energy Intensity of the Process of Grinding Raw Meat
at Restaurant Enterprises 84

Dmytro Mitiev, Volodymyr Kropivnyi
Methodological Foundations for the Development of a Measurement System
for Recording Acoustic Emission Signals during Machining 92

<i>Oleksandr Tymoshenko, Olha Musiienko, Yaroslav Demeshko</i> Technological damage to structures made by 3D printing.....	101
---	-----

Material Science

<i>Albert Azaryan, Dmitriy Shvets, Annait Trachuk, Oleksandr Shvydkyi</i> Operational Control of Iron Content in Classifier Overflow Pulp Using Gamma Radiation	108
---	-----

<i>Volodymyr Hvozdetskyi, Alexander Lukyanenko, Serhiy Markovych, Mykhailo Student, Khrystyna Zadorozhna, Nestor Mozola</i> Surface Topography of Arc-Sprayed Coatings by Cored Wires of Different Compositions and Its Influence on the Wear Mechanism.....	115
--	-----

<i>Oleh Markov, Yevhen Muzykin, Pavlo Muzykin</i> Deformation of Hollow Forgings of the Sleeve Type in the Process of Drawing Without a Mandrel by Beveled Punches.....	121
---	-----

Industrial Machinery Engineering

<i>Ivan Hevko, Andrii Gupka, Serhiy Koval, Andriy Briksa, Volodymyr Buchynsky</i> Technical and Economic Substantiation of the Effectiveness of the Use of Screw Mixers.....	129
---	-----

<i>Pavlo Luts, Ihor Babyn, Volodymyr Govorukha, Valentyna Pavlichenko</i> Results of Experimental Studies of a Cavitation Disperser of Protein-Vitamin Concentrate Feeds of Plant Origin	139
--	-----

<i>Mykhailo Mahopets, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv</i> The Influence of Ergonomics and Mechatronics Elements on the Functioning of the “Operator – Mobile Machine” System.....	148
--	-----

<i>Yuri Machok, Dmytro Artemenko, Volodymyr Amosov, Dmytro Petrenko</i> Justification of the Device to Reduce the Traction Resistance of the Plow.....	158
---	-----

<i>Hennadii Tesliuk, Valentyn Golovchenko</i> Development of Mechatronic Systems for Targeted Separation and Selection of Seed Material	167
---	-----

<i>Ihor Shepelenko, Artem Krasota, Mykhailo Krasota</i> Changing the Stress-strain State of the Working Surface of a Part with an Antifriction Coating	179
--	-----

Automation and Computer Integrated Technologies

<i>Olena Holyk, Roman Zhesan, Korsikov Oleksandr, Nerush Oleksandr</i> Methodology for Studying the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells in Artificial Conditions.....	190
--	-----

<i>Serhii Kovalov</i> Optimization of Production Time using the Reinforcement Learning Method as a Particular Case of Improving the Efficiency of Automated Production Lines	198
--	-----

Agroengineering

- Oleksii Derkach, Dmytro Makarenko, Svitlana Dmytryuk, Volodymyr Horobets, Oleksandr Livitskyi, Denys Dyachenko*
Occupational Safety in the Operation of Agro-Robots in Crop Production 206

Road Transport

- Dmytro Holub, Viktor Aulin*
Improvement of Control of the Mechatronic System of Injection of the Internal Combustion Engine of the Car 213
- Andrii Zaitsev, Viktor Aulin, Serhii Lysenko, Viktor Gud*
Organization, Principles, and System of Transport Support for Agricultural Enterprises 223
- Alla Yovchenko*
Development and Modeling of a Device to Improve Safety Control of Freight Transport with Trailers 230
- Andrii Molodan, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Artomov, Oleh Pushkarenko*
The Impact of Mechanical Losses on Engine Power of a Wheeled Vehicle under Cylinder Deactivation 236
- Serhii Tyshchenko, Andrii Serhiichuk, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv*
Methods for Determining the Needs of Car Service Enterprises in Spare Parts and Developing a Methodology for Their Impact on the Overall Performance of Cars 243
- Serhii Filatov, Ivan Vodopianov*
The Influence of Temperature Stresses Arising in the Cylinder-Piston Group During The Operation Of Cars 258

Transport Technologies

- Viktor Aulin, Daria Kulova, Valerii Varvarov*
Identification, Analysis, and Forecasting of Failure-Free Loading Risk Parameters for Finished Products at a Transport and Logistics Terminal 263
- Ivanna Berezniak, Evgeniy Slipenkyy, Viktoriia Doroshchuk, Valeriy Soroka*
Increase the Efficiency of Warehouse Processes by Modelling a Service Centre 272
- Mykola Holotiuk, Viktoriia Doroshchuk, Ivanna Berezniak*
Modern Approaches to Traffic Management in Emergency Situations 280
- Viktoriia Doroshchuk, Ivanna Berezniak, Evgeniy Slipenkyy*
Traffic Management Outside Settlements 287
- Nataliia Rozhko, Yurii Vovk, Sofiia Rozhko*
Forming a Symbiosis of the Transport Services Market and Innovation in Transport 294
- Olha Kholodova, Olena Levchenko, Maryna Buhaiova, Anastasiia Botsman*
Optimization of Urban Tram Traffic to Improve the Efficiency of the Street and Road Network 301
- Mykola Shvets, Ihor Khitrov*
Integration of Cargo Work Technologies and Transport Production Systems to Increase Transportation Efficiency 313

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

Схема організації матеріалу статті:

1. Тематика*
2. УДК
3. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
4. Місце роботи, місто, країна. e-mail
5. Назва статті.
6. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури.
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.
11. Інформація про авторів.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Turnitin

Адреса для надсилання: zbimyk_tech@kntu.kr.ua

* – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 208 Агроінженерія, 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами)

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 11(42)
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 31.03.2025р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 40,75
Тираж 300 прим. Зам. № 0837