

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 7 (293)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 7 (293) 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 7 (293) 2025

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могила В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 14 від 29 серпня 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2025

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2025

З М І С Т

Спеціальність 122

Вікулов В.В. АГЕНТ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ НА ОСНОВІ SAC ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕСТУВАННЯ НА ПРОНИКНЕННЯ	5
Зінченко І.Д., Шумова Л.О. ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРИЙМАЛЬНОЇ КОМПІЮТЕРНОЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ	12
Кіш Ю.В., Лях І.М. АВТОМАТИЗОВАНА ПОБУДОВА РЕЄСТРУ РИЗИКІВ У РОЗРОБЦІ ПЗ НА ОСНОВІ ISSUE-ТРЕКІНГУ В GITHUB PROJECTS	17

Спеціальність 133

Зенкін М.А., Ремезовський О.М., Кохановський В.О. ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ВІДПОВІДНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ	31
---	----

Спеціальність 141

Стрункін Г.М. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ ТГ-750 ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	40
--	----

Спеціальність 151

Моркун Н.В., Азарян А.А., Грищенко С.М., Рубан С.А., Грищенко А.М., Гапоненко А.А. ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН	46
Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Бобров Є.Ю. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НАДРЕШІТНОГО ПРОДУКТУ ТОНКОГО ВОЛОГОГО ГРОХОЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ	56
Сотніков Д.О., Дубовський О.Р. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАСІКОЮ	67
Gurin O.M., Duryshev O. A., Kobzarev E. V., Loriia M.G. ALGORITHM FOR IDENTIFYING OBJECTS MANAGED BY SECOND-ORDER LINKS WITH DELAY TIME	75

Спеціальність 161

Любарський Б.Г., Кривошеєв С.Ю., Єресько О.В., Галиця В.І., Сакун О.В., Любарський Д.Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГІЇ ІСКРОВОГО ЗАПАЛЮВАННЯ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮВАННЯ ДЕТОНАЦІЇ В ДЕТОНАЦІЙНІЙ ТРУБІ	84
--	----

Спеціальність 273

Фомін О.В., Логвіненко О.А., Сагін С.В., Луценко О.А., Заверкін А.В. ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ КУЛАЧКОВИХ ПРОФІЛІВ ДЛЯ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	90
--	----

CONTENTS

Speciality 122

Vikulov V.V.	SAC-BASED REINFORCEMENT LEARNING AGENT FOR AUTOMATED NETWORK PENETRATION TESTING	5
Zinchenko I.D., Shumova L.O.	DESIGN OF THE INFORMATION SYSTEM OF THE ADMISSION COMMITTEE OF A HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION.....	12
Kish Y.V., Liakh I.M.	AUTOMATED CONSTRUCTION OF A RISK REGISTER IN SOFTWARE DEVELOPMENT BASED ON ISSUE TRACKING IN GITHUB PROJECTS.....	17

Speciality 133

Zenkin M.A., Remezovskyi O.M., Kokhanovskyi V.O.	APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES TO RESTORE AND STRENGTHEN RELEVANT PARTS OF PRINTING EQUIPMENT.....	31
---	---	----

Speciality 141

Strunkin H.M.	EFFICIENCY OF WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION TG-750 ACCORDING TO THE RESULTS OF EXPERIMENTAL OPERATION.....	40
----------------------	--	----

Speciality 151

Morkun N.V., Azaryan A.A., Hryshchenko S., M., Ruban S. A., Gritsenko A. M., Gaponenko A.A.	FORMATION OF AN INFORMATION BASE FOR AUTOMATED CONTROL	46
Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Bobrov E.Y.	MODELING THE DYNAMICS OF THE OVERFLOW PRODUCT IN FINE WET SCREENING OF IRON ORE.....	56
Sotnikov D.O., Dubovskyi O.R.	DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE INFORMATION SYSTEM FOR APIARY MANAGEMENT	67
Gurin O.M., Duryshch O.A., Kobzarev E.V., Loria M.G.	ALGORITHM FOR IDENTIFYING OBJECTS MANAGED BY SECOND-ORDER LINKS WITH DELAY TIME.....	75

Speciality 161

Liubarskyi B.G., Kryvosheiev S.Y., Eresko O.V., Galitsa V.I., Sakun O.V., Liubarskyi D.B.	RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SPARK IGNITION ENERGY ON THE DETONATION INITIATION PROCESS IN A DETONATION TUBE	84
--	---	----

Speciality 273

Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Sagin S.V., Lutsenko O.A., Zaverkin A.V.	FEATURES OF SYNTHESIS OF OPTIMAL CAM PROFILES FOR GAS DISTRIBUTION MECHANISMS OF TRANSPORT VEHICLES.....	90
--	---	----

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-5-11>

УДК 004.056:004.8

АГЕНТ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ НА ОСНОВІ SAC ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕСТУВАННЯ НА ПРОНИКНЕННЯ

Вікулов В.В.

SAC-BASED REINFORCEMENT LEARNING AGENT FOR AUTOMATED NETWORK PENETRATION TESTING

Vikulov V.V.

Загрози кібербезпеці та збитки від кіберзлочинності щороку продовжують зростати. За прогнозами, до кінця 2025 року загальні збитки досягнуть 10,5 трлн доларів, що в 3,5 рази перевищує збитки від кібербезпеки, зафіксовані в 2015 році. Зі зростанням використання штучного інтелекту зловмисниками зростає потреба в захисних інструментах, які також використовують можливості штучного інтелекту.

Ця стаття продовжує дослідницьку тенденцію застосування навчання з підкріпленням до тестування вразливостей безпеки в комп'ютерних мережах. Для досягнення цієї мети в якості тестового середовища використовується Network Attack Simulator (NASim). NASim – це симулятор, призначений для оцінки автоматизованого тестування на проникнення за допомогою підкріплювального навчання, побудований на базі фреймворку Gymnasium.

У цій статті представлено гібридний алгоритм підкріплювального навчання, який поєднує архітектуру Soft Actor-Critic (SAC) з дискретними просторами дії, що дозволяє алгоритму SAC ефективно працювати в середовищі.

Алгоритм тестувався за допомогою сценарію `nasim:Small-v0`. Експериментальні результати демонструють, що запропонований метод досягає декількох значних показників ефективності. По-перше, алгоритм демонструє стабільну конвергенцію протягом усього процесу навчання, що свідчить про надійну динаміку навчання. По-друге, метод демонструє виняткову ефективність у компрометації системи, вимагаючи в середньому лише 8,63 кроків під час пізніх етапів навчання для повної компрометації цільових систем. По-третє, алгоритм має ідеальний стовідсотковий рівень успішності під час фази оцінки, демонструючи надійність та стабільну продуктивність.

Крім того, алгоритм досягає середньої винагороди в розмірі 184,61 на пізніх етапах навчання, що свідчить про високу ефективність при потенційному застосуванні в галузі кібербезпеки. Однак ці результати вимагають тривалого навчання, а для більш складних сценаріїв може знадобитися ще більше часу. Це створює компроміс між обчислювальною ефективністю та якістю роботи, який необхідно враховувати при практичному впровадженні.

Ключові слова: навчання з підкріпленням, кібербезпека, NASim, SAC.

Вступ. Кібербезпека стає однією з найкритичніших проблем сучасного цифрового суспільства. Кількість і складність атак щороку зростають, незважаючи на наявні інструменти захисту, що створює постійну гонку між кіберзлочинцями та фахівцями з безпеки. Ситуація ускладнюється і появою нових інструментів для атакуючої сторони, включаючи великі мовні моделі (LLM) та інші технології штучного інтелекту, які значно знижують бар'єр входу для проведення складних кібератак та дозволяють автоматизувати процеси.

Згідно зі звітом Cybersecurity Ventures [1], глобальні збитки від кіберзлочинності у 2025 році прогнозуються на рівні \$10.5 трильйонів доларів США, що означає зростання більш ніж у 3.5 рази у порівнянні зі збитками 2015 року.

Застосування навчання з підкріпленням у кібербезпеці має практичний сенс через кілька ключових особливостей цього підходу. По-

перше, навчання з підкріпленням добре підходить для моделювання процесу атаки як послідовності дій, де кожен крок залежить від попередніх результатів, що точно відповідає реальній поведінці у мережі атакуючої сторони. По-друге, на відміну від класичного машинного навчання, яке потребує великих наборів даних, навчання з підкріпленням може покращуватися через взаємодію з середовищем, отримуючи сигнал винагороди лише від кінцевого результату (успішна атака чи ні). Це особливо корисно в кібербезпеці, де складно отримати якісно розмічені дані про всі етапи атак. Крім того, агенти навчання з підкріпленням можуть адаптуватися до нових сценаріїв без необхідності перенавчання на нових даних, що важливо в умовах постійної еволюції загроз.

Для практичного дослідження таких підходів необхідні спеціалізовані симуляційні середовища, які б дозволили безпечно тестувати алгоритми без ризику для реальних систем.

Network Attack Simulator (NASim) [2] реалізовано як середовище Gymnasium, що забезпечує стандартизований інтерфейс для алгоритмів навчання з підкріпленням. Хоча NASim є спрощеною абстракцією реальних мережевих середовищ, він надає достатню складність для навчання агентів виконанню багатоетапних атак. Використання фреймворку Gymnasium дозволяє легко інтегрувати різні алгоритми підкріплювального навчання та забезпечує консистентний API для взаємодії агента з середовищем, що критично важливо для порівняння ефективності різних підходів до автоматизації кібератак.

Метою роботи є дослідження ефективності сучасних алгоритмів навчання з підкріпленням, зокрема адаптованого Soft Actor-Critic (SAC) для автоматизації мережевих атак у симуляційному середовищі NASim. Основні завдання включають адаптацію SAC для роботи з дискретним простором дій NASim, порівняльний аналіз ефективності різних підходів та оцінку їх потенціалу для практичного застосування в кібербезпеці.

Огляд літератури. Schwartz та Kurniawati (2019) [2] вперше запропонували платформу NASim для навчання з підкріпленням у тестуванні на проникнення. Вони використали Q-навчання і показали, що воно може знаходити оптимальні шляхи атак у різних мережах. Але метод добре працював тільки для маленьких мереж з невеликою кількістю дій.

Becker та ін. (2024) [3] порівняли A3C, DQN і Q-learning у NASim. A3C зміг вирішити всі

сценарії NASim та узагальнювати знання між різними варіантами середовища. DQN і Q-learning показали гірші результати, особливо коли тренувалися на кількох сценаріях одночасно.

Li, Zhang та Yang (2024) [4] розробили EPPTA – метод на основі SAC з модулем “belief state” для роботи в умовах неповної інформації. Він навчався у 20 разів швидше за інші та отримував майже максимальну винагороду у сценаріях NASim, у тому числі в “Small” сценарії.

Tan та ін. (2022) [5] представили CRLA – каскад агентів, які розбивають простір дій на менші підзадачі. Хоча вони тестували це у CybORG, підхід добре підходить і для NASim-подібних завдань.

Janisch, Pevný та Lisý (2023) [6] створили NASimEmu, щоб вирішити головну проблему NASim: агенти добре працюють у симуляції, але погано у реальних мережах. NASimEmu дозволяє навчати агента у швидкій симуляції, а потім тестувати його на реальних віртуальних машинах. Експерименти показали, що агенти успішно переносяться з симуляції у реальне середовище.

CyberBattleSim [7] є експериментальним симуляційним середовищем, розробленим Microsoft Research для дослідження застосування навчання з підкріпленням у кібербезпеці [4]. На відміну від NASim, який фокусується на абстрактних представленнях мережевих топологій, CyberBattleSim моделює більш реалістичні сценарії кібератак з детальним відтворенням процесів lateral movement та privilege escalation. Середовище побудоване на основі фреймворку OpenAI Gym. Ключовою особливістю CyberBattleSim є можливість моделювання складних багатоетапних атак з урахуванням різних типів вразливостей, включаючи експлойти нульового дня та соціальну інженерію. Однак складність середовища призводить до значно більших вимог до обчислювальних ресурсів та часу навчання порівняно з більш абстрактними симуляторами типу NASim. Це робить CyberBattleSim особливо цінним для дослідження складних сценаріїв, але менш практичним для швидкого прототипування та тестування нових алгоритмів.

Wang та ін. (2023) [8] запропонували DQfD-AIPT, який тестувався на розроблених ними сценаріях для CyberBattleSim. У сценаріях з “honeypot”-вузлами він знаходив ціль швидше

та унікав пасток, отримуючи вищу винагороду, ніж звичайний DQN.

Методологія. Network Attack Simulator має досить низькі нагороди, що робить застосування навчання з підкріпленням особливо складним завданням. Агент отримує позитивний сигнал лише після успішного виконання повного сценарію атаки, при цьому NASim навіть не винагороджує за проміжні кроки, необхідні для компрометування окремих систем. Це означає, що агенту необхідно виконати певну послідовність правильних дій без отримання підкріплюючих сигналів на проміжних етапах, при цьому більшість випадкових дій не призводять до прогресу. Така структура винагород створює проблему розрідженої винагороди, що є реалістичним відображенням реальних задач кібербезпеки, де успіх досягається лише через ретельне планування та точне виконання багатоетапних атак.

У запропонованому рішенні не було застосовано додаткових винагород, тобто тільки ті, що були передбачені розробником NASim. Також це необхідно для порівняння з результатами інших дослідників.

Сценарій `nasim:Small-v0` було обрано для дослідження з декількох ключових причин.

По-перше, сценарій відтворює типову мережу малих та середніх розмірів, яка на сьогоднішній день може відповідати конфігурації мереж досить великих компаній та корпорацій. Це робить його особливо актуальним для моделювання реальних кібератак та оцінки ефективності захисних механізмів.

По-друге, складність та розмір сценарію є оптимальними для навчання моделей машинного навчання, оскільки він містить достатню кількість вузлів для створення складних шляхів атак, не є надмірно складним, що дозволяє ефективно навчати модель, та забезпечує певний баланс між реалістичністю та обчислювальною складністю.

Обраний сценарій складається з 8 комп'ютерів, розподілених між двома основними операційними системами: Windows та Linux.

На емульованих комп'ютерах запущено 3 сервіси: FTP, SSH та HTTP. Ці сервіси представляють типові вектори атак: FTP – через слабкі паролі та неправильні конфігурації, SSH – для горизонтального переміщення в мережі, HTTP – як початкову точку атак через веб-інтерфейси.

Серед процесів, що виконуються в емульованому середовищі, використано Apache Tomcat Server та DACLSVC. Tomcat є сервером Java-додатків, а DACLSVC – це Windows-сервіс для управління доступом.

Запропонований алгоритм також було протестовано для сценарію `Nasim:Medium-v0`, який складається з мережі у 2 рази більшої за розміром (16 комп'ютерів). Проте навчання на більшому сценарії потребувало значно більше обчислювальних ресурсів та часу для досягнення аналогічного рівня конвергенції. Це зумовлено експоненційним зростанням простору станів та дій при збільшенні розміру мережі. Враховуючи обмежені обчислювальні можливості та необхідність проведення множинних експериментів для валідації результатів, було прийнято рішення зосередитися на сценарії `nasim:Small-v0` як оптимальному компромісі між складністю задачі та практичністю експериментування.

У даному дослідженні було обрано алгоритм Soft Actor-Critic (SAC) з адаптацією для дискретного простору дій. Цей вибір обумовлений кількома ключовими факторами, що роблять SAC особливо придатним для задач кібербезпеки.

По-перше, NASim використовує дискретний простір дій, де агент обирає конкретну дію/атаку з фіксованого набору можливих дій. Оригінальний SAC розроблений для роботи з неперервними діями, тому виникла необхідність адаптації алгоритму. Для вирішення цієї проблеми було реалізовано `DiscreteToBoxActionWrapper`, який перетворює дискретний простір дій у неперервний простір `Box(0,1)` розмірністю n , де n відповідає кількості можливих дій. Агент генерує неперервний вектор, після чого обирається дія з найвищою ймовірністю.

По-друге, ключовою перевагою SAC є вбудована `entropy regularization`, яка заохочує агента до дослідження різноманітних стратегій атак.

По-третє, для реалізації було обрано SAC з бібліотеки `stable-baselines3 (SB3)`, яка забезпечує гнучке налаштування основних гіперпараметрів. Це дозволяє легко експериментувати з різними конфігураціями навчання, включаючи швидкість навчання, розміри буферів та архітектуру нейронних мереж, без необхідності модифікації основного коду. Така реалізація особливо важлива для швидшого тестування різних налаштувань при виконанні дослідницьких завдань.

Таблиця 1

Гіперпараметри алгоритму SAC (для SB3)

Параметр	Значення за замовчуванням	Опис
Learning Rate	3×10^{-4}	Швидкість навчання
Discount Factor (γ)	0.99	Коефіцієнт дисконтування
Replay Buffer Size	1,000,000	Розмір буфера досвіду
Batch Size	256	Розмір батча
Soft Update Coefficient (τ)	0.005	Коефіцієнт м'якого оновлення target мереж
Hidden Layer Size	256	Кількість нейронів у прихованих шарах
Entropy Coefficient	auto	Автоматичне налаштування коефіцієнта ентропії

Навчання агента проводилося протягом 509,000 кроків взаємодії з середовищем. Цей обсяг було обрано як компроміс між достатністю для конвергенції та обчислювальними обмеженнями. Хоча була закладена можливість використання CUDA, обчислення виконувалися швидше на CPU через кілька факторів: відносно невеликий розмір нейронних мереж (два шари по 256 нейронів, що забезпечує достатню репрезентативну потужність для навчання складних стратегій атак без надмірного ускладнення моделі), помірний розмір батча (256) та overhead від постійної передачі даних між CPU та GPU.

Після завершення навчання ефективність агента оцінюється на 100 незалежних епізодах з детерміністичною політикою (без exploration). Система винагород у NASim побудована таким чином, що агент отримує позитивну винагороду за успішне досягнення цільового стану (компрометація цільової системи) та негативну або нульову винагороду за невдалі спроби або проміжні кроки. Таблиця 2 описує використані метрики оцінювання.

Таблиця 2

Метрики оцінювання ефективності

Метрика	Спосіб обчислення
Рівень успішності – відсоток успішних атак	$(\text{Кількість успішних епізодів} / 100) \times 100\%$
Середня кількість кроків за епізод	Середнє арифметичне кроків по всіх епізодах
Винагорода – сумарна винагорода за епізод	Сума всіх винагород протягом епізоду

Успішність епізоду визначається через виклик методу `env.unwrapped.goal_reached()`, який повертає True, якщо агент досяг цільового стану – повного злому системи. Average Steps дозволяє оцінити ефективність стратегії: менша кількість кроків для досягнення мети свідчить про більш оптимальну поведінку агента.

Після завершення навчання натренована модель зберігається для подальшого аналізу та використання. Підтримується логування метрик у TensorBoard для візуального аналізу процесу навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для валідації запропонованого підходу було проведено декілька експериментів із тренування SAC-агента на сценарії `nasim:Small-v0`. Кожен експеримент підтверджувався декількома запусками. Обидва експерименти виконувалися з однаковими гіперпараметрами, окрім learning rate та кількості кроків.

Експеримент 1 виконувався на понад 500 тисяч кроків з learning rate 3×10^{-4} .

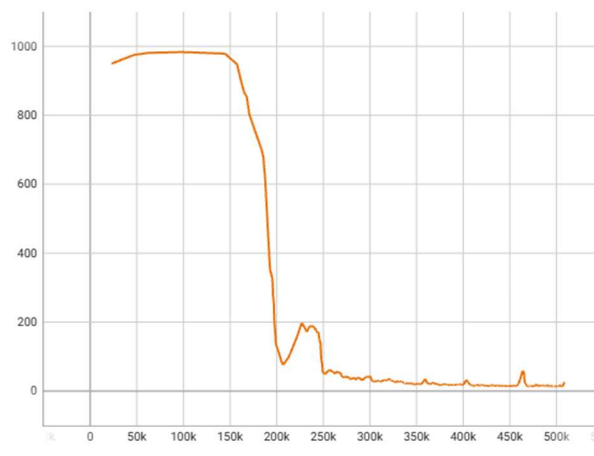


Рис. 1. Графік кількості кроків, необхідних для повного компрометування мережі. Експеримент 1

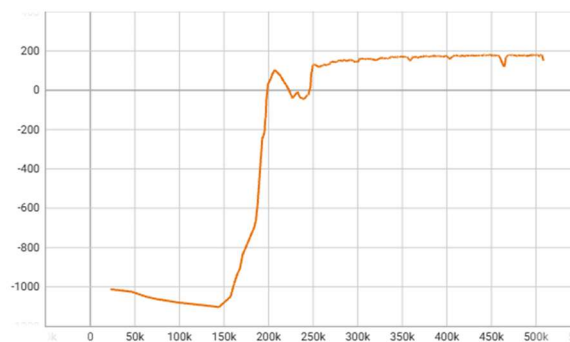


Рис. 2. Графік отриманих нагород під час навчання. Експеримент 1

Експеримент 2 виконувався на понад 1.4 мільйони кроків з learning rate $5 \cdot 10^{-4}$. Цікаво, що після мільйона кроків все ще продовжувалися покращуватися метрики кількості кроків та винагороди, проте швидкість цього покращення була незначною.

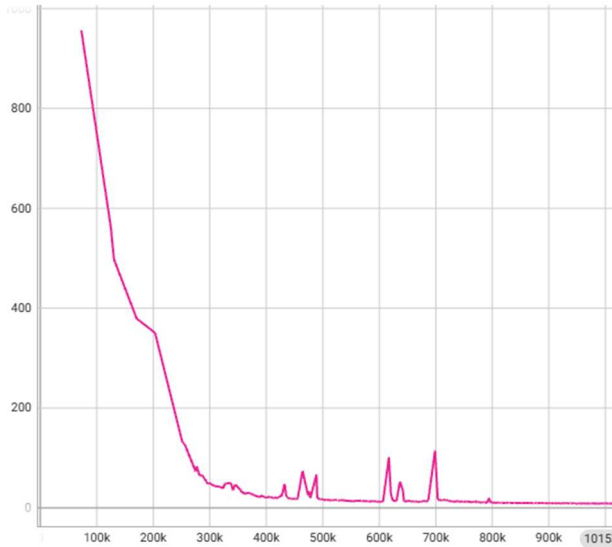


Рис. 3. Графік кількості кроків, необхідних для повного компрометування мережі. Експеримент 2

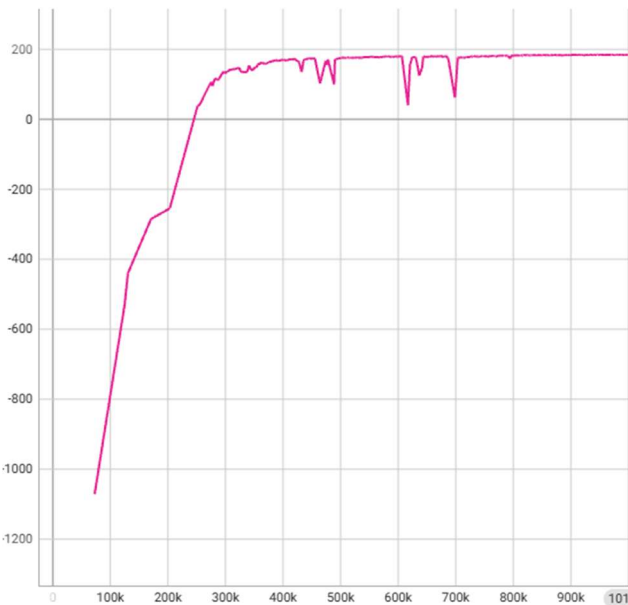


Рис. 4. Графік отриманих нагород під час навчання. Експеримент 2

Особливо цінним є той факт, що запропонований підхід досягає 100% рівня успішності в обох експериментах на фінальних етапах навчання. Це означає, що в контрольованому середовищі агент здатен гарантовано виконувати поставлені завдання,

що є критично важливим для автоматизованих систем безпеки.

Таблиця 3

Порівняльні результати різних експериментів SAC

Метрика	SAC експеримент 1	SAC експеримент 2	Оптимальне значення
Середня кількість кроків (останні 100 епізодів)	14.68	8.63	8.0
Мінімальна кількість кроків	13.11	8.40	8.0
Середня винагорода (останні 100 епізодів)	177.14	184.61	186.0
Максимальна винагорода	179.34	185.09	186.0

Оптимальне значення вказано в конфігурації сценарію [9]. Результати показують стабільну збіжність алгоритму до оптимального рішення. Як впливає з таблиці 3, найкращий експеримент (другий) досяг середньої кількості кроків 8.63 на останніх 100 епізодах, що становить відхилення лише 7.9% від теоретичного оптимуму (8 кроків). Середня винагорода 184.61 балів становить 99.2% від максимально можливої винагороди (186 балів), що свідчить про здатність агента знаходити майже оптимальні шляхи атаки.

Порівняємо у таблиці 4 досягнуті результати з результатами інших дослідників, наведеними у статті [10]:

Таблиця 4

Порівняльний аналіз алгоритмів для вирішення сценарію pasim:Small-v0

Алгоритм	Середня нагорода	Середня кількість кроків
SAC (дане дослідження, експеримент 2)	184.61	8.63
EPPTA	184.9	8.4
Recurrent PPO	184.8	8.4
NDSPI-DQN	174.0	17.3
HA-DQN	-256.2	464.9

Наведені результати підтверджують ефективність запропонованої адаптації SAC для дискретних просторів дій у контексті кібербезпеки.

Як впливає з рисунків 1-4, процес навчання характеризується:

1. Відносно швидкою початковою збіжністю: алгоритм демонструє стрімке покращення ефективності на досить ранніх етапах навчання.

2. Стабільною фінальною продуктивністю: останні епізоди показують консистентні результати без значних коливань.

Водночас, важливо визнати обмеження поточного дослідження. Тестування проводилося виключно на сценарії `nasim:Small-v0`, який, хоча і репрезентативний для багатьох реальних ситуацій, все ж таки є спрощеною абстракцією складних корпоративних мереж. Масштабованість підходу на більші та складніші сценарії залишається відкритим питанням, яке потребує подальшого дослідження.

Висновки. У даному дослідженні було успішно адаптовано алгоритм Soft Actor-Critic (SAC) для роботи з дискретним простором дій у середовищі Network Attack Simulator (NASim) та продемонстровано його високу ефективність для автоматизації мережових атак.

Запропонована адаптація SAC показала відмінні результати на сценарії `nasim:Small-v0`. Алгоритм досяг середньої кількості кроків 8.63 при оптимальному значенні 8.0 (відхилення лише 7.9%) та середньої винагороди 184.61 балів при максимально можливій винагороді в 186 балів (99.2% від оптимуму). Важливим досягненням є 100% рівень успішності на фінальних етапах навчання в обох експериментах, що демонструє надійність запропонованого підходу.

Порівняльний аналіз з наявними рішеннями показав, що адаптований SAC досягає результатів, схожих з алгоритмами EPPTA та Recurrent PPO, значно перевершуючи базові підходи типу PPO та DQN.

Результати дослідження підтверджують високий потенціал застосування алгоритмів навчання з підкріпленням для вирішення практичних задач автоматизованого тестування на проникнення. Запропонована адаптація SAC забезпечує стабільні та близькі до оптимальних результати, що робить її перспективною основою для розробки більш досконалих систем кібербезпеки та автоматизованого виявлення вразливостей у мережовій інфраструктурі.

Література

1. Cybersecurity Ventures. *Cyberwarfare 2021 Report*. 2021. URL: <https://cybersecurityventures.com/wp-content/uploads/2021/01/Cyberwarfare-2021-Report.pdf> (дата звернення: 13.08.2025).
2. Qu, S., Du, W., Chen, C., Li, B., & Qiu, M. *A survey on reinforcement learning applications in cybersecurity*. arXiv preprint arXiv:1905.05965, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.05965> (дата звернення: 13.08.2025).
3. Becker, N., Reti, D., Ntagiou, E. V., Wallum, M., & Schotten, H. D. *Evaluation of Reinforcement Learning for Autonomous Penetration Testing using A3C, Q-learning and DQN*. arXiv, 2024. doi: [10.48550/arXiv.2407.15656](https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15656).
4. Li, Z., Zhang, Q., & Yang, G. *EPPTA: Efficient partially observable reinforcement learning agent for penetration testing applications*. *Engineering Reports*, 2024. doi: [10.1002/eng2.12818](https://doi.org/10.1002/eng2.12818).
5. Tran, K., Standen, M., Kim, J., Bowman, D., Richer, T., Akella, A., & Lin, C. T. *Cascaded reinforcement learning agents for large action spaces in autonomous penetration testing*. *Applied Sciences*, 2022, 12(21), 11265. doi: [10.3390/app122111265](https://doi.org/10.3390/app122111265).
6. Janisch, J., Pevný, T., & Lisý, V. *NASimEmu: Network attack simulator & emulator for training agents generalizing to novel scenarios*. arXiv preprint arXiv:2305.17246, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.17246> (дата звернення: 13.08.2025).
7. Microsoft. *CyberBattleSim: An experimentation research platform to investigate automated agents operating in simulated enterprise environments*. 2021. URL: <https://github.com/microsoft/CyberBattleSim> (дата звернення: 13.08.2025).
8. Wang, Y., Li, Y., Xiong, X., Zhang, J., Yao, Q., & Shen, C. *DQD-AIPT: An intelligent penetration testing framework incorporating expert demonstration data*. *Security and Communication Networks*, 2023, 5834434. doi: [10.1155/2023/5834434](https://doi.org/10.1155/2023/5834434).
9. Schwartz, J. *Network Attack Simulator — small.yaml scenario*. GitHub, 2023. URL: <https://github.com/Jschwartz/NetworkAttackSimulator/blob/4f26de37cfdc3e4553ed8b7484c4db8e2924bdea/nasim/scenarios/benchmark/small.yaml> (дата звернення: 13.08.2025).
10. Li, Z., Zhang, Q., & Yang, G. *EPPTA: Efficient partially observable reinforcement learning agent for penetration testing applications*. *Engineering Reports*, 2025, 7(1): e12818. doi: [10.1002/eng2.12818](https://doi.org/10.1002/eng2.12818).

Vikulov V.V. SAC-based reinforcement learning agent for automated network penetration testing

Cybersecurity threats and cybercrime damage continue to escalate annually. Projections indicate that total damages will reach \$10.5 trillion by the end of 2025, representing a 3.5-fold increase from the cybersecurity damages recorded in 2015. With the rise of AI adoption by malicious actors, there is an increasing need for defensive tools that also leverage AI capabilities.

This paper continues the research trend of applying reinforcement learning to penetration testing for identifying security vulnerabilities in computer networks. To achieve this objective, the Network Attack Simulator (NASim) is employed as a testing environment. NASim is a simulator designed for evaluating automated penetration testing through reinforcement learning, built on the Gymnasium framework.

This paper presents a hybrid reinforcement learning algorithm specifically, which combines the Soft Actor-Critic (SAC) architecture with discrete action spaces, thereby enabling the SAC algorithm to operate effectively within environment.

The algorithm underwent evaluation using the *nasim:Small-v0* scenario. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves several noteworthy performance metrics. First, the algorithm exhibits stable convergence behavior throughout the

training process, indicating robust learning dynamics. Second, the method demonstrates exceptional efficiency in system compromise, requiring an average of 8.63 steps during late training episodes to fully compromise target systems. Third, the algorithm maintains a perfect 100% success rate during the evaluation phase, demonstrating reliable and consistent performance.

Additionally, the algorithm achieves an average reward of 184.61 in later training stages, indicating strong performance for potential cybersecurity applications. However, these results require extensive training time, with potentially even longer training periods needed for more complex scenarios. This creates a trade-off between computational efficiency and performance quality that must be considered for practical implementation.

Keywords: reinforcement learning, cybersecurity, NASim, SAC.

Вікулов Владислав Вікторович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», v.vikulov@kpi.ua

Стаття подана 05.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-12-16>

УДК 004.94:378

ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРИЙМАЛЬНОЇ КОМІСІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Зінченко І.Д., Шумова Л.О.

DESIGN OF THE INFORMATION SYSTEM OF THE ADMISSION COMMITTEE OF A HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION

Zinchenko I.D., Shumova L.O.

У статті розглянуто питання щодо проєктування інформаційної системи для автоматизації роботи з документами вступників у приймальній комісії закладу вищої освіти під час вступної кампанії. Інформаційна система, що розроблюється, являє собою вебзастосунок і орієнтована на співробітників, відповідальних за прийом фізичних документів, як от реєстратори, оператори та посадові особи, що контролюють процес вступу. Основна мета проєктованої системи полягає в забезпеченні швидкого та зручного внесення даних про вступників у момент подачі документів. Вступники додаються в систему на основі вже існуючої бази даних, що дозволяє уникнути повторного введення особистих даних і мінімізувати можливі помилки. Ключовою особливістю проєктованої системи є впровадження засобів інтелектуального аналізу даних, що позбавить співробітників рутинних завдань із перевірки документів, дозволяючи зосередитися на вирішенні справді складних і нестандартних ситуацій. Для досягнення основної мети вирішено комплекс завдань. Зокрема, проаналізовано недоліки традиційного підходу до обробки документів вступників у закладах вищої освіти. Обґрунтовано доцільність впровадження інформаційно-аналітичної системи для централізованого зберігання та автоматизації обробки заяв. Представлено функціональні моделі проєктованої системи AS-IS та TO-BE. Запропоновано архітектуру удосконаленої інформаційної системи та розроблено окремі програмні модулі для імпорту вхідних даних і автоматичної класифікації справ вступників за комплектністю документів з подальшою інтеграцією до повнофункціональної системи підтримки приймальної кампанії. Запропонована архітектура базується на реляційній моделі бази даних, клієнт-серверній структурі та

алгоритмах класифікації. Програмне забезпечення розроблено з використанням мови програмування Python, бібліотек pandas, tkinter, mysql.connector. Для моделювання бази даних застосовано MySQL Workbench, розробку здійснено у середовищі PyCharm. Показано ефективність підходу на тестових наборах. Система готова до подальшої інтеграції та масштабування.

Ключові слова: інформаційні технології, інформаційна система приймальної комісії, проєктування інформаційної системи, DFD, UML.

Вступ. Вступна кампанія в Україні здійснюється з використанням електронних систем, серед яких ключову роль відіграє ЄДЕБО [1]. З кожним роком обсяги інформації зростають, що ускладнює процеси контролю, перевірки та аналізу документів. Значна частина рутинної роботи (як-от перевірка комплектності документів, фіксація статусів справ чи ведення звітності) досі виконується вручну або за допомогою неструктурованих засобів (Excel, Google Диск, фізичні папки).

Це створює навантаження на працівників приймальної комісії та підвищує ризик помилок. Саме тому актуальним є створення інформаційної системи, яка б централізувала всі ключові процеси та автоматизувала критичні етапи обробки документів.

Запропоноване рішення поєднує базу даних, алгоритми аналізу та імпорту даних, а також графічні моделі процесів для наочного відображення поточного та бажаного стану системи. Його новизна полягає в тому, що система орієнтована не лише на зберігання

даних, а й на виявлення "проблемних" заяв і їхню підготовку до подальшої обробки.

Метою досліджень є проектування інформаційної системи приймальної комісії закладу вищої освіти (ЗВО), що удосконалює процеси обліку та обробки документів абітурієнтів шляхом їх автоматизації.

Поставлені такі задачі:

- дослідити проблеми недостатньої автоматизації процесу прийому та обробки документів вступників;
- змоделювати існуючі процеси та побудувати цільову модель майбутньої системи;
- спроектувати архітектуру інформаційної системи;
- реалізувати базові алгоритми обробки заяв (класифікацію, імпорт);
- оцінити ефективність реалізованих компонентів на тестових наборах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження предметної області обрано методи функціонального та структурного моделювання [2, 3] Нотація IDEF0 застосована для опису загального процесу вступної кампанії, а DFD — для детального виявлення потоків даних у процесі подачі документів. Для точного відображення взаємодії між учасниками вступної кампанії була обрана UML-діаграма послідовності (Sequence Diagram), яка дає змогу продемонструвати хронологію обміну повідомленнями між об'єктами системи [4, 5]. Саме цей тип діаграми дозволяє детально описати логіку процесу: від подачі заяви абітурієнтом, перевірки документів і формування рейтингових списків — до остаточного зарахування. Завдяки цьому можна наочно показати, як саме відбувається передача даних та взаємодія між ключовими сторонами (як от вступник, приймальна комісія, ЄДЕБО та інші) на кожному етапі вступної кампанії. Такий підхід дозволяє чітко структурувати процеси, виявити критичні точки взаємодії й забезпечити прозорість системного функціонування. На рисунку 1 представлено UML-діаграма послідовності для аналізу динаміки змін у статусах заяв.

На рисунку 2 представлено DFD-модель, що демонструє ключові інформаційні потоки між вступником, приймальною комісією, базою даних та ЄДЕБО. Ці підходи забезпечують зрозумілу візуалізацію проблемних ділянок та дозволяють формалізувати логіку взаємодії між компонентами системи.

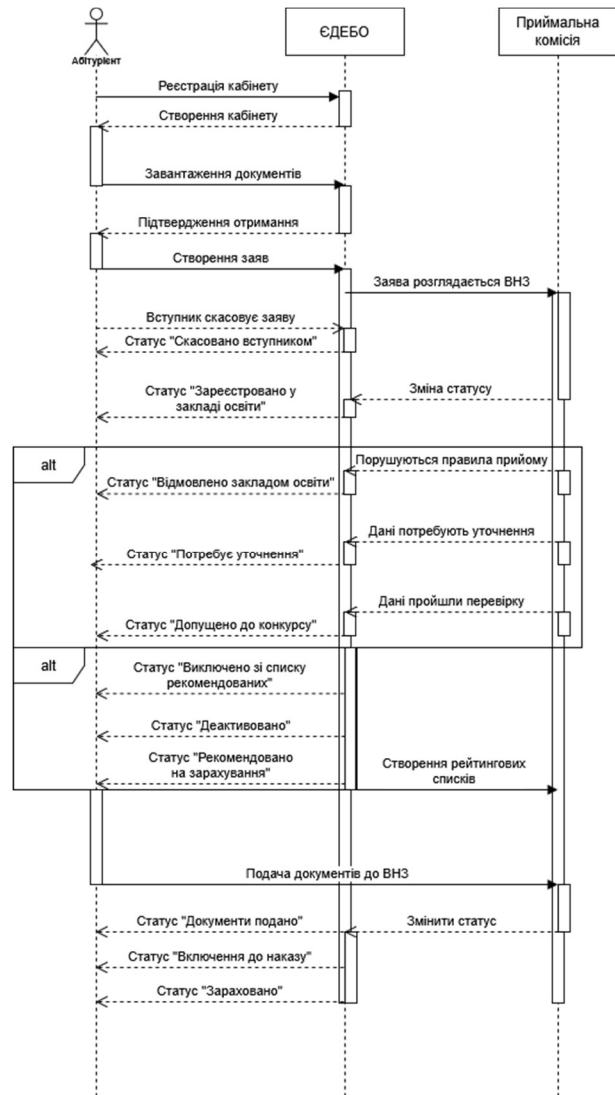


Рис. 1. Хронологія обміну даними під час вступної кампанії

У результаті моделювання виявлено низку проблем:

- подвійне подання документів (в електронному вигляді та фізично), що призводить до дублювання обліку та ускладнює верифікацію;
- відсутність централізованого цифрового обліку, через що дані зберігаються в Excel-таблицях, на хмарах або у паперових теках;
- відсутність автоматизованого контролю «проблемних» заяв, що унеможливило оперативне реагування на помилки чи нестачу документів;
- ведення ручних нотаток про статуси, що ускладнює пошук інформації та сприяє її втраті.

Ці проблеми мають прямі наслідки: помилки при формуванні списків, затримки у прийомі та низька прозорість процесу для відповідальних осіб.

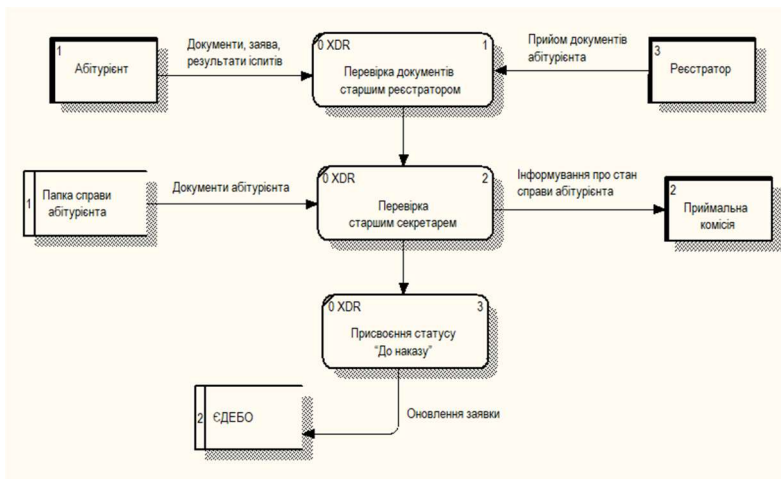


Рис. 2. Діаграма потоків даних процесу «Подача документів у ЗВО»

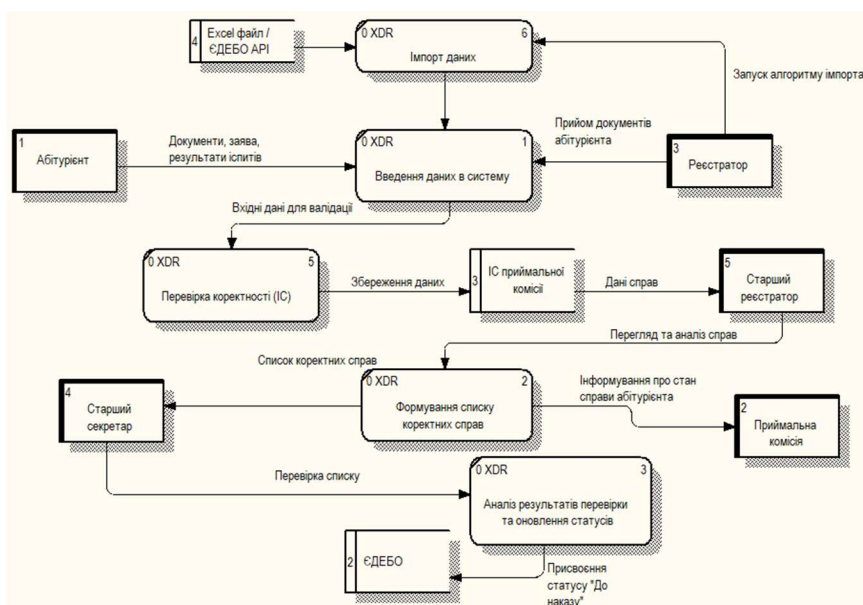


Рис. 3. DFD-діаграма автоматизованого процесу «Подача документів у ЗВО»

Для вирішення виявлених проблем було розроблено модель TO-BE, яка демонструє нову архітектуру процесів після впровадження інформаційної системи (рис. 3).

Запропоновано клієнт-серверну архітектуру з чітким розподілом на три рівні: представлення, прикладна логіка та зберігання даних. На рисунку 4 зображено загальну структуру цієї архітектури, що ілюструє взаємодію між основними компонентами системи.

Інформаційна система ґрунтується на реляційній моделі [6]. ER-діаграма описує сутності: Вступник, Документи, Контакти, СтатусСправи, ТипВійськовогоДокумента. Для логічної структури побудовано UML-діаграму

класів, яка показує основні методи («аналізує», «зчитує», «записує») та зв'язки між компонентами. Особливу увагу приділено алгоритмам:

- імпорту з Excel, що дозволяє уникнути ручного введення;
- класифікації заяв за ступенем комплектності, віковими та індивідуальними особливостями;
- підготовки до експорту у зовнішні формати (перспективна функція).

Система реалізована мовою Python із використанням бази даних MySQL. Основну увагу приділено реалізації модулів імпорту даних та класифікації заяв вступників за критерієм комплектності поданих документів.

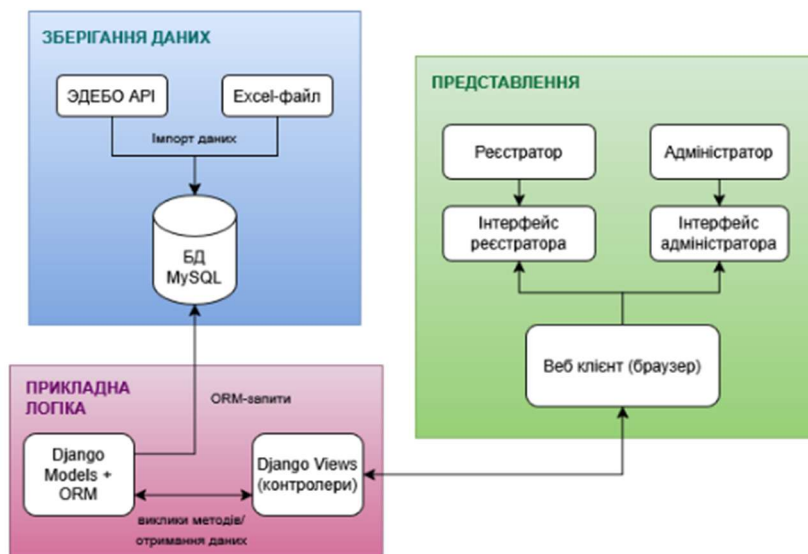


Рис. 4. Архітектурна схема ІС

Алгоритм класифікації був протестований на наборі з 20 заяв, у яких модуль автоматично визначив, чи є комплект документів повним згідно з передбаченим шаблоном. Усі записи були класифіковані коректно, що свідчить про працездатність логіки на тестових прикладах. Варто зауважити, що мова йде саме про формальну перевірку наявності документів, а не про їхню юридичну чи змістову правильність.

Для оцінки ефективності було проведено порівняння з реальними діями працівників приймальної комісії, які зазвичай виконуються вручну:

- у поточній практиці перевірка комплектності однієї справи займає в середньому 2–4 хвилини: працівник звіряє документи за списком, фіксує статус вручну, шукає уточнення в пошті або на аркушах із нотатками;

- у реалізованій системі після імпорту даних з Excel статус комплектності визначається автоматично. Обробка 20 справ триває менше хвилини, без потреби в ручній перевірці кожного запису;

- також у системі передбачено автоматичне віднесення неповних справ до категорії “проблемних”, що дозволяє їх відфільтрувати одразу, без ручного пошуку. У традиційному підході пошук справ із нестачею документів займає від 3 до 10 хвилин, залежно від якості організації зберігання даних.

Отже, система істотно скорочує час на первинну технічну перевірку заяв та спрощує подальший контроль, зменшуючи навантаження на співробітників. При цьому остаточну

перевірку та прийняття рішень все одно виконує оператор, що дозволяє поєднати автоматизацію та відповідальність.

Висновки. У статті представлено проєкт і реалізацію інформаційної системи для автоматизації роботи приймальної комісії ЗВО. Система вирішує ключові проблеми — дублювання даних, втрату інформації, ручну перевірку комплектності — та пропонує централізоване зберігання й аналіз документів вступників.

Особливістю рішення є поєднання класичних методів моделювання з практично реалізованими алгоритмами аналізу. Система вже виконує базові функції класифікації та імпорту, демонструючи позитивні результати на тестових даних.

Обмеженням нинішньої версії є відсутність повноцінного модуля звітності, інтеграції з ЄДЕБО та систем авторизації. Проте архітектура ІС дозволяє масштабування і подальший розвиток. У майбутньому планується впровадження експорту заяв, генерації звітів і синхронізації з державними інформаційними ресурсами.

Література

1. Про затвердження Порядку прийому на навчання для здобуття вищої освіти в 2025 році. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0312-25#Text>.
2. Основи автоматизованої обробки інформації – принципи побудови інформаційних систем. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.

- URL: <https://studfile.net/preview/10045748/page:3/> (дата звернення: 20.06.2025)
- Data Flow Diagram (DFD) – візуалізація потоків даних у системі. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-flow-diagram (дата звернення: 20.06.2025)
 - Макоєдова В. Проектування інформаційної системи приймальної комісії на основі UML-діаграм. Наука і техніка сьогодні. 2023. № 9(23). URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-9\(23\)-634-642](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-9(23)-634-642).
 - Unified Modeling Language (UML) – вступ до уніфікованого моделювання програмних систем. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.https://www.geeksforggeeks.org/unified-modeling-language-uml-introduction/ (дата звернення: 20.06.2025)
 - Реляційна модель даних – базові поняття та принципи побудови баз даних. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.https://www.bestprog.net/uk/2017/09/18/basic-concepts-of-the-relational-data-model_ua/ (дата звернення: 20.06.2025)

References

- Pro zatverdzhennya Poryadku pryomu na navchannya dlya zdobuttya vyshchoyi osvity v 2025 rotsi. Ofitsiynyy vebportal parlamentu Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0312-25#Text>.
- Osnovy avtomatyzovanoi obrobky informatsiyi – pryntsypy pobudovy informatsiynykh system. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: www.https://studfile.net/preview/10045748/page:3/ (data zvernennya: 20.06.2025)
- Data Flow Diagram (DFD) – vizualizatsiya potokiv danykh u systemi. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: www.https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-flow-diagram (data zvernennya: 20.06.2025)
- Makoyedova V. Proyektuvannya informatsiynoyi systemy pryymal'noyi komisiyi na osnovi UML-diahram. Nauka i tekhnika s'ohodni. 2023. № 9(23). URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-9\(23\)-634-642](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-9(23)-634-642).
- Unified Modeling Language (UML) – vstup do unifikovanoho modelyuvannya prohrannykh system. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: www.https://www.geeksforggeeks.org/unified-modeling-language-uml-introduction/ (data zvernennya: 20.06.2025)
- Relyatsiyina model' danykh – bazovi ponyattya ta pryntsypy pobudovy baz danykh. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: www.https://www.bestprog.net/uk/2017/09/18/basic-concepts-of-the-relational-data-model_ua/ (data zvernennya: 20.06.2025)

Zinchenko I.D., Shumova L.O. Design of the information system of the admission committee of a higher educational institution

The paper discusses the design of information system to automate work with documents of applicants in the admissions office of a higher education institution during the admission campaign. The developed information system is a web application which is focused on employees responsible for receiving physical documents, such as registrars, operators and officials who control the admission process. The main goal of the designed system is to ensure quick and convenient entry of data about applicants at the time of submitting documents. Applicants are added to the system based on an existing database, which allows you to avoid re-entering personal data and minimize possible errors. A key feature of the designed system is the implementation of data mining tools, which will relieve employees of routine tasks of document verification, allowing them to focus on solving truly complex and non-standard situations. To achieve the main goal, a set of tasks was solved. In particular, the shortcomings of the traditional approach to processing documents of applicants in higher education institutions were analyzed. The feasibility of implementing an information and analytical system for centralized storage and automation of application processing is substantiated. Functional models of the designed AS-IS and TO-BE system are presented. The architecture of an improved information system is proposed and separate software modules are developed for importing input data and automatically classifying applicants' cases by the completeness of documents with subsequent integration into a fully functional admission campaign support system. The proposed architecture is based on a relational database model, client-server structure and classification algorithms. The software is developed using the Python programming language, pandas, tkinter, mysql.connector libraries. MySQL Workbench was used for database modeling, and development was carried out in the PyCharm environment. The effectiveness of the approach is demonstrated on test sets, and a comparison is made with the real actions of admissions committees. The system is ready for further integration and scaling.

Keywords: information technology, admissions office information system, information system design, DFD, UML.

Зінченко Ірина Данилівна – бакалавр кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kn-21d-162@snu.edu.ua

Шумова Лариса Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: shumova@snu.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-17-30>

УДК 004.42:005.334

АВТОМАТИЗОВАНА ПОБУДОВА РЕЄСТРУ РИЗИКІВ У РОЗРОБЦІ ПЗ НА ОСНОВІ ISSUE-ТРЕКІНГУ В GITHUB PROJECTS

Кіш Ю.В., Лях І.М.

AUTOMATED CONSTRUCTION OF A RISK REGISTER IN SOFTWARE DEVELOPMENT BASED ON ISSUE TRACKING IN GITHUB PROJECTS

Kish Y.V., Liakh I.M.

У статті розглянуто актуальну проблему автоматизації процесу побудови реєстру ризиків у розробці програмного забезпечення на основі аналізу даних issue-трекінгу в GitHub Projects. В умовах зростання складності програмних продуктів та високої динаміки змін життєвого циклу IT-проектів традиційні ручні підходи до ідентифікації ризиків дедалі більше втрачають свою ефективність через затримки оновлення інформації та значні людські витрати. Автором запропоновано концепцію та реалізовано прототип Python-скрипта, який забезпечує автоматизоване виділення, попередню обробку, багаторівневу класифікацію та формування структурованого реєстру ризиків, що дозволяє інтегрувати цей процес безпосередньо у звичний життєвий цикл управління якістю проекту. Запропонований підхід ґрунтується на класифікації ризиків за визначеною таксономією, що охоплює сім основних типів: інженерні, середовищні, процесні, пов'язані з обмеженнями, безпекові, поведінкові та зовнішні ризики. Для кожної групи ризиків визначено перелік релевантних ключових слів і текстових індикаторів, що забезпечує ефективну роботу алгоритму keyword matching у поєднанні з аналізом labels, коментарів та стану задач. У межах апробації скрипт було протестовано на штучно сформованому датасеті, що містить понад 150 завдань (issues) з різноманітними текстами, наближеними до реальної практики відкритих проектів. Важливою особливістю прототипу є можливість мультикласової класифікації, коли одна задача може одночасно відповідати кільком групам ризиків, що адекватно відображає міждисциплінарність сучасних проблем у сфері розробки ПЗ. Ефективність роботи скрипта забезпечується високою швидкістю: середній час обробки повного масиву даних не перевищує 1,5 секунди, що дозволяє інтегрувати рішення у

регулярні CI/CD-конвеєри через GitHub Actions. Стаття також окреслює методологічну базу прогнозування ефективності розробленого підходу з використанням даних із сучасних досліджень, зокрема результатів моделі BEASop-TD, яка продемонструвала F1-міру понад 0.81–0.86 на реальних наборах issue-трекінгу. Це дозволяє аналітично прогнозувати потенційну точність запропонованого підходу на рівні 80–85% за належного донавчання та адаптації ключових слів під специфіку проекту. Запропоноване рішення дозволяє не лише виявляти проблемні зони на ранніх етапах, але й формувати основу для подальшої прогностичної аналітики щодо впливу ризиків на часові, фінансові та якісні параметри розробки. Крім того, скрипт створює структурований реєстр у форматах JSON та Excel із налаштованим оформленням і надає візуалізацію розподілу типів ризиків за допомогою діаграм у Matplotlib, що підвищує прозорість та зручність використання результатів аналізу. Отримані дані можуть інтегруватися у системи управління якістю або передаватися стейкхолдерам для своєчасного прийняття рішень. У підсумку доведено, що запропонована автоматизована побудова реєстру ризиків на основі GitHub Projects є перспективним напрямом удосконалення процесів управління якістю ПЗ та управління технічним боргом, а розроблений прототип демонструє приклад практичної реалізації цієї концепції у поєднанні з гнучкими підходами Agile та DevOps.

Ключові слова: issue-трекінг GitHub, реєстр ризиків, автоматизована класифікація, управління якістю ПЗ, технічний борг, Python-скрипт, прогнозування ризиків.

Вступ. В умовах зростаючої складності програмних систем та широкого застосування гнучких методологій розробки управління ризиками залишається критичною складовою забезпечення якості програмного забезпечення. Незважаючи на розвиток численних підходів до ідентифікації та класифікації ризиків, практична інтеграція ризик-менеджменту у повсякденний життєвий цикл IT-продукту часто ускладнена через відсутність оперативної, актуальної інформації про прояви ризиків у робочих артефактах проєкту. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання даних issue-трекінгу як джерела сигнальної інформації про ризики різних категорій.

Відомо, що на сучасних платформах розробки, таких як GitHub Projects, накопичується значна кількість відкритих даних: issues, pull requests, коментарі, історія комітів та метрики активності команд. Ці дані потенційно містять важливі індикатори як технічних боргів (technical debt), так і організаційних або процесних ризиків. Однак традиційний підхід до формування реєстру ризиків залишається переважно ручним та декларативним, що знижує його релевантність у швидкозмінному середовищі розробки.

Сучасні дослідження демонструють, що використання методів машинного навчання та NLP для автоматизованого аналізу змісту задач і обговорень дозволяє підвищити точність виявлення ризиків. Зокрема, у роботі Karthik Shivashankar et al. (2025) запропоновано модель BEACon-TD для класифікації технічних боргів на основі трансформерів, що довела свою ефективність при роботі з масштабними архівами GitHub Issues [1]. Подібним чином у CAPRA (Tang et al., 2025) розроблено контекстно-орієнтовану систему оцінки патч-ризиків, що враховує специфіку відкритого коду та допомагає своєчасно виявляти незрілі або потенційно небезпечні зміни [2]. Ці приклади засвідчують високий потенціал автоматизованих підходів, які використовують реальні трекінгові дані.

Водночас, у рамках сучасних концепцій управління якістю IT-продуктів, важливо не лише ідентифікувати окремі фактори ризику, але й забезпечити їх класифікацію та моніторинг у режимі реального часу.

Автоматизована побудова реєстру ризиків на основі issue-трекінгу у GitHub Projects дозволяє поєднати ідеї моніторингу якості, управління технічним боргом та динамічної

адаптації заходів управління ризиками протягом життєвого циклу продукту. Основною метою цієї статті є розробка концепції та інструментального рішення (Python-скрипт або GitHub Action), що забезпечує автоматизоване вилучення, класифікацію та реєстрацію ризиків з урахуванням специфіки окремого проєкту та його поточного стану.

Автоматизована побудова реєстру ризиків у розробці програмного забезпечення (ПЗ) дедалі частіше розглядається як ключовий напрям удосконалення управління якістю та технічним боргом. Значна частина досліджень фокусується на інтеграції сучасних методів машинного навчання та обробки природної мови (NLP) для класифікації ризиків безпосередньо з трекерів задач, таких як GitHub Projects.

Аналіз існуючих досліджень.

Дослідження Karthik Shivashankar та співавт. [1] присвячене побудові автоматизованої системи класифікації технічного боргу (TD) у завданнях issue-трекінгу для різних open-source проєктів. Автори розробили підхід BEACon-TD (Binary Ensemble for Automated Classification of Technical Debt), який поєднує кілька спеціалізованих двійкових класифікаторів на основі трансформерних моделей типу DistilRoBERTa. Така ансамблева архітектура дозволяє ідентифікувати як наявність боргу загалом, так і його тип (архітектурний, тестовий, кодовий тощо) із високою точністю.

Методологія дослідження включала збирання великого корпусу GitHub Issues за період 2015–2024 рр., а також перевірку моделей на аут-оф-дистрибуційних (OOD) даних, що дозволило оцінити їхню здатність до генералізації у реальних промислових умовах. Важливим аспектом є порівняльний аналіз різних моделей: автори довели перевагу спеціалізованих бінарних класифікаторів над мультикласовими та виявили, що менш ресурсоємна DistilRoBERTa після тонкого налаштування перевершує більші LLM-моделі (наприклад, GPT-4o) за ключовими метриками (Precision, Recall, F1, MCC).

Серед отриманих результатів слід відзначити середню F1-міру понад 0.81 на тестових наборах та стабільність показників на OOD-наборах. Додатково було підтверджено, що fine-tuning моделей на даних конкретного проєкту підвищує якість класифікації до 20–30% для більшості метрик. Це підходить до ідеї гнучкого, адаптивного реєстру ризиків у розробці ПЗ, коли класифікаційна модель може

враховувати специфіку проекту та поточний контекст трекінгових даних.

BEACon-TD демонструє реальну можливість масштабованої та детальної ідентифікації технічного боргу з використанням даних issue-трекінгу, що безпосередньо перегукується з завданнями автоматизованого формування реєстру ризиків у GitHub Projects у контексті даного дослідження.

У дослідженні Benxiao Tang та співавт. [2] запропоновано метод CAPRA (Context-Aware Patch Risk Assessment), що фокусується на виявленні так званих «immature vulnerabilities» у відкритому програмному забезпеченні ще на стадії перегляду патчів. Автори обґрунтовують необхідність такого підходу тим, що в колаборативних open-source проектах різномірний рівень кваліфікації розробників та складність коду часто ускладнюють своєчасне виявлення дефектів без урахування контексту змін. Традиційні методи статичного аналізу або ручного аудиту, як правило, спрацьовують лише після злиття патча, що відкриває вікно для тривалого існування прихованих вразливостей.

CAPRA реалізує інтеграцію статичного аналізу безпосередньо у CI/CD-процес за допомогою code property graph (CPG), який об'єднує синтаксичну структуру, контрольні потоки виконання та залежності даних. Система виконує поелементний аналіз кожного патча, порівнюючи початкові (pre-patched) та змінені файли (post-patched), що дозволяє визначати потенційні пам'яттєві витoki (memory leaks) та Use-After-Free вразливості до їх потрапляння у production. Особливість CAPRA — детекція ризиків за сценаріями «доданих» та «видалених» рядків коду, що робить її гнучкою та релевантною для рутинних рев'ю невеликих патчів.

За результатами експериментів на оригінальному датасеті (з використанням OpenSSH та «hupocrite commits») модель досягла середньої точності 97,3% при recall близько 98% та лише 3,5% false positive, що демонструє високу практичну ефективність запропонованого рішення [2]. Автори підкреслюють, що така контекстно-орієнтована оцінка підвищує якість перевірки безпеки навіть для малих патчів (<30 LOC), які традиційно отримують мінімальну увагу рецензентів.

CAPRA демонструє можливість застосування контекстного аналізу змін для підвищення точності оцінки ризиків у динамічних середовищах розробки. Це безпосередньо корелює з метою даної статті —

розширити принципи класифікації ризиків з рівня патчів на рівень задач issue-трекінгу GitHub, формуючи основу для автоматизованого та адаптивного реєстру ризиків протягом життєвого циклу ПЗ.

Дослідження Cataldo Basile, Bjorn De Sutter та співавт. [3] присвячене розробці, впровадженню та автоматизації комплексного підходу до управління ризиками в контексті захисту ПЗ від атак типу Man-At-The-End (MATE). У таких атаках зломисник має повний контроль над середовищем виконання і може застосовувати будь-які інструменти реверс-інжинірингу, що ставить під загрозу ключові активи — алгоритми, ключі шифрування чи ліцензійні механізми. Автори пропонують застосовувати стандартизовану методологію управління ризиками на основі підходу NIST SP800-39, адаптованого для сфери програмного захисту.

У роботі окремо наголошено, що класичні SP (Software Protection) техніки часто базуються на security-through-obscurity і залишаються малоефективними через відсутність формалізації та автоматизації. Для подолання цих недоліків Basile та колеги поєднують bottom-up і top-down дизайн: знизу вони розробляють Proof-of-Concept (PoC) інструмент підтримки прийняття рішень (ESP), а зверху — формують універсальну модель ризик-менеджменту, що описує конструкти, моделі, методи й можливості їх автоматизації.

Важливо, що валідовані експерименти PoC показали, що навіть часткова автоматизація дозволяє підвищити узгодженість рішень експертів і зменшити залежність від суб'єктивних оцінок. Зокрема, перевірка інструменту на кейсах реальних Android-додатків засвідчила корисність моделі для промислових сценаріїв. Авторами також сформульовано відкриті дослідницькі питання щодо формалізації оцінки ефективності SP, розробки спільної термінології та обґрунтованого ризик-аналізу в домені MATE.

З точки зору контексту теми даної статті, такий підхід є показовим прикладом того, як стандартизований та частково автоматизований ризик-менеджмент може бути реалізований для складних сценаріїв, де ручна експертиза має обмеження масштабованості. Аналогічні принципи — формалізація, автоматизоване прийняття рішень і опора на перевірені стандарти — можуть бути використані при побудові реєстру ризиків у розробці ПЗ на основі issue-трекінгу GitHub, що прямо

підсилює обґрунтування практичного підходу у цій роботі.

У дослідженні Ashley T. van Can та співавт. [4] розглянуто проблему ідентифікації вимог у беклогах, що зберігаються в системах issue-трекінгу в умовах Agile-розробки. Автори акцентують увагу на тому, що через мінімалізм формальної документації у гнучких командах беклоги часто містять вимоги, змішані з багами, завданнями та ідеями, без чіткої структуризації. Це ускладнює простежуваність і подальше тестування, що є критичним для підтримки якості ПЗ.

В межах першої частини роботи автори виконали кількісний контент-аналіз 1636 елементів беклогу із 14 проєктів (як open-source, так і корпоративних). Результати показали високу непослідовність у маркуванні backlog items: у середньому понад 40% записів із позначкою «вимога» фактично не містили вимог, а близько 22% записів, що були марковані як завдання, навпаки, містили одну або кілька вимог. Також було встановлено, що часто в одному елементі беклогу фіксується одразу кілька вимог різного рівня деталізації, що ускладнює їх унікальну ідентифікацію та трасування.

Друга частина дослідження зосереджена на оцінці ефективності великих мовних моделей (LLM) для автоматизованого вилучення та класифікації вимог. Van Can та колеги експериментально порівняли encoder-only моделі (BERT, RoBERTa) з decoder-only моделями (ChatGPT, Mistral 7B, Llama 3) за задачами ідентифікації та класифікації вимог. Результати показали, що моделі типу BERT та RoBERTa демонструють стабільно вищі показники Precision, Recall і F1-міри для класів «користувацькі функціональні вимоги», «системно-орієнтовані функціональні» та «нефункціональні вимоги», ніж генеративні LLM. Зокрема, середня F1-міра для класу вимог склала понад 0.57 для RoBERTa, тоді як для ChatGPT — лише близько 0.38.

Автори роблять висновок про доцільність створення unobtrusive інструментів, які б автоматично визначали й класифікували вимоги без зміни звичних практик команди. Це напряму співзвучно із завданням побудови автоматизованого реєстру ризиків, оскільки такі підходи можна адаптувати для витягання індикаторів ризиків з backlog items у GitHub Projects. Отримані результати демонструють потенціал використання LLM та encoder-only моделей для покращення прозорості й

керованості інформації у життєвому циклі розробки.

У роботі Shekar Ramachandran та співавт. [5] досліджується автоматизація класифікації системних логів із використанням глибинного навчання для підвищення точності та ефективності аналізу аномалій у великих обсягах неструктурованих даних. Автори підкреслюють, що традиційні методи аналізу логів часто потребують значних ручних зусиль і не масштабуються для складних кластерних середовищ, що дедалі активніше використовуються у хмарних технологіях.

Ключовим внеском дослідження є розробка власного конвеєра обробки, що включає нову техніку векторизації LogWord2Vec, методи очищення й аугментації даних, а також гібридну архітектуру на основі CNN-LSTM. Техніка LogWord2Vec дозволяє перетворювати неструктуровані логи у числові вектори, зберігаючи частотні характеристики слів та обробляючи синоніми, що мінімізує ризики переобучення моделей на вузькому словнику розробників. Автори також застосували лівостороннє падінгування, що дає змогу LSTM ефективніше відновлювати послідовності після «шуму» нульових значень.

Важливою складовою підходу є продумана аугментація даних для балансування класів: оскільки помилкові рядки трапляються значно рідше, застосовується заміна слів на синоніми, перестановка та вибіркоче видалення слів у рядках логів. Такий підхід дозволяє уникнути перекосу даних і підвищує стійкість класифікатора.

У експериментах Ramachandran та колеги порівняли різні методи векторизації, включаючи BERT, TensorFlow TextVectorization та власний LogWord2Vec. Найкращі результати показала модель CNN-LSTM з LogWord2Vec, досягнувши точності класифікації 99.19% при лише 0.81% помилкових класифікацій. Для порівняння, BERT продемонстрував значно гірші результати через низьку релевантність загального словника для специфічних логів.

У контексті теми даної статті розглянута робота демонструє, що поєднання глибинного навчання, кастомних методів векторизації та аугментації може значно підвищити якість обробки текстових артефактів у розробці ПЗ. Аналогічні підходи можуть бути адаптовані для автоматизованої класифікації та виявлення ризиків на основі текстових даних issue-трекінгу у GitHub Projects.

У роботі Ziwei Liu та співавт. [6] представлено дизайн та прототип системи моніторингу транзакцій і зворотного зв'язку щодо ризиків, орієнтованої на DevOps-процеси у високонавантажених фінансових середовищах. Автори наголошують, що традиційні підходи до моніторингу та оцінки ризиків часто не справляються з обробкою великих обсягів транзакційних даних у реальному часі, що призводить до низької точності прогнозів і несвоєчасного реагування.

Запропонована система базується на мікросервісній архітектурі, що забезпечує модульність і масштабованість для підтримки високої конкурентності та низької затримки обробки даних. Ключовою особливістю є інтеграція методів машинного навчання для автоматичного виявлення аномальних транзакцій і генерації прогнозів ризиків. Архітектура включає чотири основні модулі:

1. Збір та попередня обробка даних (з використанням Python та Redis для кешування);
2. Модуль реального часу, що застосовує Elasticsearch для агрегації даних та аномалій;
3. Модуль прогнозування ризиків, де використовуються SVM, Decision Tree та Random Forest із балансуванням класів (SMOTE) для підвищення точності моделей;
4. Модуль зворотного зв'язку, який використовує Kafka та мультимедіальне сповіщення (Email, SMS, корпоративні чати) для оперативної доставки повідомлень про ризики відповідальним особам.

Автори показали, що використання Grubbs' Outlier Test та KNN у стадії очищення даних дозволяє суттєво знизити рівень хибних спрацьовувань. Експериментальна оцінка продемонструвала, що комбінування мікросервісів та ML-моделей значно підвищує ефективність моніторингу, забезпечуючи швидке виявлення транзакцій з високим ризиком і своєчасну реакцію в рамках DevOps-конвеєра.

Цей підхід має безпосереднє значення для даного дослідження: поєднання архітектурних рішень, модульного моніторингу та алгоритмів класифікації може бути адаптовано для формування автоматизованого реєстру ризиків у розробці ПЗ. Зокрема, принципи цілісного циклу «збір–аналіз–прогноз–зворотний зв'язок» можуть лягти в основу Python-скриптів або GitHub Actions, що здійснюють класифікацію ризиків на основі даних issue-трекінгу GitHub Projects.

У роботі Mohammed Amin Almaiah та співавт. [7] виконано комплексну класифікацію кіберзагроз, вразливостей і відповідних заходів протидії у сфері систем управління базами даних (DBMS). Автори підкреслюють, що через критичність даних, які зберігаються у базах, ці системи залишаються однією з найпопулярніших цілей для кібератак. Дослідження систематизує технічні та нетехнічні загрози, їх поширеність та наслідки, а також окреслює практичні кроки з впровадження контрзаходів.

Методологія роботи ґрунтується на контент-аналізі, який охоплює велику вибірку даних з реальних інцидентів. Зокрема, SQL-ін'єкції та атаки типу DoS ідентифіковано як найбільш поширені технічні загрози — кожна з них становить 9% зареєстрованих випадків. До другої групи загроз увійшли уразливі audit trail-и, спроби вторгнень і атаки програм-вимагачів (ransomware). Серед нетехнічних загроз найбільш поширеними є внутрішні інсайдерські загрози (5%), що особливо актуально для організацій з великою кількістю користувачів з розширеними привілеями.

Особливу увагу Almaiah та колеги приділили взаємозв'язку між типами загроз і вразливостей. Найбільш поширеними вразливостями визначено слабку автентифікацію, непатчені бази даних, уразливі audit trail-и та мультиакаунтинг, кожен з яких становить близько 9% від усіх інцидентів. Другий рівень складають баги в ПЗ, небезпечні практики кодування, слабкі засоби контролю безпеки, проблеми з мережами, неправильне використання паролів та слабе шифрування.

У якості рекомендацій дослідження пропонує багаторівневий комплекс контрзаходів: від шифрування, багатofакторної автентифікації, сегментації мережі й Honeypots до застосування систем IDS/IPS, спам-детекторів та поведінкової аналітики. Особливо підкреслюється значення підвищення обізнаності працівників і регулярних аудитів.

У контексті даної статті цей підхід демонструє цінність класифікації ризиків і побудови динамічного реєстру на основі актуальних даних. Принципи картографування загроз і вразливостей можна безпосередньо застосувати до аналізу активності issue-трекінгу у GitHub Projects, що створює можливість для автоматизованої побудови і адаптації реєстру ризиків протягом життєвого циклу ПЗ.

Дослідження Named Hasani, Francesco Freddi та Riccardo Piazza [8] представляє

комплексний AI-драйвовий фреймворк для автоматизованого моніторингу структурного стану (Structural Health Monitoring, SHM), що інтегрує всі ключові етапи: модальну ідентифікацію, моніторинг стану та локалізацію пошкоджень — із урахуванням впливу зовнішніх і експлуатаційних факторів. Автори зазначають, що традиційні SHM-системи часто ігнорують змінні умови експлуатації (температура, вологість, навантаження), що призводить до хибних тривог і обмежує ефективність таких систем.

Запропонований фреймворк використовує поєднання стохастичної субпросторової ідентифікації (SSI-Cov) для автоматизованого визначення модальних параметрів із кластеризацією Gaussian Mixture Model (GMM) для стабільного вибору полюсів. Для безперервного моніторингу стану впроваджено autoencoder-нейронні мережі (AE-ANN), які навчаються на «здоровому» стані структури, а виявлення аномалій ґрунтується на пороговому аналізі помилок реконструкції. Для автоматизованої локалізації пошкоджень застосовано комбінований підхід: дискретне вейвлет-перетворення (DWT) для багаторівневої декомпозиції сигналу та AE-LSTM для розпізнавання шаблонів відхилень.

Фреймворк валідовано на лабораторній моделі мосту, де демонстровано його здатність точно ідентифікувати втрати жорсткості навіть при впливі температури та вологості. Результати підтвердили, що поєднання GMM, LSTM та wavelet-аналізу мінімізує хибні спрацьовування і дає високі показники достовірності пошкоджень у реальному часі.

У контексті теми цієї статті проаналізована робота є прикладом того, як інтеграція ML-методів і автоматизованих процесів на всіх рівнях моніторингу дозволяє отримати гнучкі та адаптивні системи оцінки ризиків. Аналогічно, такі методи можуть застосовуватися для побудови автоматизованого реєстру ризиків на основі issue-трекінгу GitHub, де зовнішні фактори (наприклад, сезонність комітів чи зміни в командах) також можуть спотворювати оцінку ризиків. Таким чином, підхід Hasani та колеґ є релевантним взірцем для розробки Python-скриптів або GitHub Actions для динамічного спостереження й класифікації ризиків протягом життєвого циклу ПЗ.

У дослідженні Zsuzsa Farkas та співавт. [9] представлено комплексний підхід до систематичної ідентифікації нових ризиків у харчовому ланцюзі із застосуванням сучасних

методів обробки даних і багаторівневої експертної оцінки. Автори наголошують, що завчасне виявлення так званих emerging risks є критично важливим для захисту здоров'я споживачів та забезпечення сталого розвитку галузі, однак воно ускладнюється великими обсягами різнорідних даних і прогалинами в інформації.

Ключовою складовою роботи є розробка уніфікованої процедури тривірневої фільтрації: від початкового збору та попереднього аналізу даних (PHASE I), через відбір потенційних emerging risks (PHASE II), до їх остаточної оцінки за системою багатокритеріального скорингу (PHASE III). Для підтримки цього процесу команда використовує різні алгоритми машинного навчання, методи text mining і мережевий аналіз, що суттєво скорочує трудомісткість ручної перевірки.

Емпірична перевірка методики показала її ефективність: у 2020–2021 рр. командою Farkas та колеґ було виявлено 58 emerging risks, класифікованих у 10 основних тем. Це мікробіологічна безпека свіжих продуктів, проблеми з кормами для тварин, мікро- та нанопластики, стійкість до антимікробних препаратів, хімічні контамінації, питання сталого розвитку (зокрема альтернативні джерела білка), технологічні інновації, вплив кліматичних змін, поява нових патогенних мікроорганізмів і споживчі тренди. Окремі ризики стали основою для нових національних моніторингових програм і були передані для подальшої оцінки у рамках Emerging Risk Exchange Network (EREN) Європейського органу EFSA.

Особливу увагу приділено інтеграції автоматизованих алгоритмів із експертними оцінками. Автори зазначають, що навіть найкращі алгоритми не можуть повністю замінити людське експертне судження, зокрема на стадіях остаточного скорингу і прийняття рішень про заходи реагування.

У контексті дослідження ця робота є цінним прикладом того, як систематизований моніторинг, багатоетапна фільтрація та використання AI-технологій можуть бути адаптовані для побудови реєстрів ризиків у розробці ПЗ. Зокрема, аналогічний принцип відбору індикаторів і трендів із потоків issue-трекінгу GitHub дозволяє створювати Python-скрипти чи GitHub Actions, які автоматично оновлюють реєстр ризиків, враховуючи як кількісні сигнали, так і експертну інтерпретацію.

У роботі A.K.M. Ahasan Habib, Mohammad Kamrul Hasan та співавт. [10] описано створення та публікацію унікального набору даних UKMNCT_PoT_FDIA, призначеного для дослідження атак підміни даних (False Data Injection, FDI) у середовищах Industrial Internet of Things (IIoT), що є ключовим компонентом інфраструктури Industry 5.0. Автори підкреслюють, що зростаюча складність і взаємозв'язаність IIoT-систем підвищують ризики впровадження FDI-атак, які здатні маніпулювати переданими даними та порушувати точність оцінок стану системи.

Особливістю підходу є побудова гетерогенного середовища для збору реалістичних даних з імітацією різних сценаріїв атак: реплей-атаки, симуляційні скрипти, реальний MitM-трафік. Зібрані дані містять понад 15 000 записів з 30 атрибутами, включаючи IP-адреси, протоколи, порти, довжину пакетів, статуси SSL та HTTP-запитів. Це дозволяє дослідникам моделювати поведінку атак у різних мережевих конфігураціях.

Набір даних апробовано за допомогою ансамблевого ML-алгоритму Gradient Boosting, що показав високі результати: F1-score, Precision і Recall — 0.99 для класифікації атак і нормального трафіку. Також автори продемонстрували низький рівень FP та FN помилок, що підтверджує надійність даних для тренування та тестування систем виявлення вторгнень.

У статті наголошується, що доступність подібних реалістичних датасетів сприяє розробці ефективних алгоритмів детекції та попередження атак у IIoT, що є критично важливим для підвищення безпеки критичної інфраструктури — енергетики, розумних міст і промислових об'єктів.

У контексті теми цієї статті цей підхід демонструє значущість побудови спеціалізованих наборів даних та моделей класифікації аномалій, які можуть бути перенесені на аналіз текстових артефактів у GitHub Projects. Використання Python-скриптів чи GitHub Actions для автоматизованого збору та класифікації ризиків issue-трекінгу ґрунтується на аналогічних принципах: симуляція реальних сценаріїв ризиків, гнучке налаштування атрибутів і постійне оновлення тренувальних даних.

У роботі Muhammad Hassan, Giovanna Salbitani, Simona Carfagna та Javed Ali Khan [11] розроблено високоточну та інтерпретовану систему автоматизованої класифікації

планктону, що поєднує глибоке навчання, оптимізоване злиття ознак та explainable AI. Автори зазначають, що традиційна таксономічна ідентифікація планктону є трудомісткою, потребує високої кваліфікації та схильна до помилок, що значно гальмує екологічний моніторинг морських екосистем.

Ключовою інновацією дослідження є гібридна модель, яка об'єднує потужності InceptionResNetV2 (з трансферним навчанням) та нової нейронної мережі DeepPlanktonNet, натренованої з нуля для захоплення специфічних ознак даних. Для підвищення дискримінативної здатності було реалізовано злиття ознак, а для скорочення надлишкових даних і підвищення обчислювальної ефективності — Whale Optimization Algorithm (WOA). Додатково для забезпечення прозорості застосовано підхід LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations), що дозволяє зрозуміти, як модель приймає рішення, і виявити найбільш релевантні ділянки зображень планктону.

Експерименти на відкритому датасеті WHOI продемонстрували точність класифікації 98.79%, що суттєво перевищує показники попередніх state-of-the-art рішень. Автори також порівняли гібридну модель з низкою традиційних архітектур CNN і класичних ML-класифікаторів, що підтвердило переваги запропонованого підходу за всіма ключовими метриками (F1-score, Precision, Recall) і показало зниження обчислювальних витрат після WOA-оптимізації.

У контексті теми цієї статті дослідження Hassan та колег демонструє релевантність комплексних гібридних фреймворків для автоматизації обробки великих і складних даних, що критично важливо при побудові реєстрів ризиків. Зокрема, використання оптимізації ознак і explainable AI є корисним прикладом для проектування Python-скриптів або GitHub Actions, що можуть не лише класифікувати issue у GitHub Projects, а й робити цей процес прозорим і обґрунтованим для стейкхолдерів.

У статті Alfredo Sánchez-Hernández, Dídac Román, Peyman Javadi та Inés Domingo [12] розглянуто впровадження інтегрованого підходу GIS та SfM-фотограмметрії для моніторингу фізичних змін і оцінки ризиків на пам'ятках наскельного мистецтва. Автори наголошують, що традиційні методи археологічного моніторингу часто є недостатніми для вчасного виявлення

деградаційних процесів, які можуть не лише зруйнувати безцінні культурні об'єкти, а й створювати небезпеку для відвідувачів.

Дослідження передбачало розробку та апробацію триетапної методики, яка поєднує побудову цифрових моделей рельєфу (DEM) із регулярними фотограмметричними обстеженнями та обробкою в GIS для порівняння змін у часі. Для цього команда реалізувала два експериментальні кейси на природних скельних стінах і один повноцінний кейс — на реальному археологічному об'єкті La Covatina, який є частиною Світової спадщини ЮНЕСКО.

В експериментах метод успішно виявив як великі втрати скельного матеріалу, так і мікроскопічні зміни розміром у кілька квадратних сантиметрів. Зокрема, результати показали, що навіть незначні зсуви або утворення тріщин у скельних шарах можуть бути зафіксовані, що дозволяє прогнозувати ризики подальших обвалів. У реальному кейсі було задокументовано понад 50 фізичних змін (зокрема обвали різного масштабу), що підтверджує практичну цінність підходу для довготривалого моніторингу.

Додатково, автори звертають увагу на проблеми автоматизації при роботі на відкритому повітрі: зміни освітлення, погодні умови та вплив рослинності створюють шум у моделях, тому частину аналізу доводиться доповнювати візуальною експертною перевіркою.

У контексті теми цієї статті робота Sánchez-Hernández та колег є важливою ілюстрацією того, як поєднання просторових технологій, 3D-моделювання і регулярного моніторингу дозволяє будувати динамічні системи оцінки ризиків у режимі реального часу. Такий принцип може бути застосований для автоматизованого формування реєстрів ризиків у ПЗ, де зміни в issue-трекінгу GitHub Projects можуть аналізуватися за допомогою Python-скриптів чи GitHub Actions, використовуючи аналогічну логіку періодичного порівняння стану системи і побудови моделей ризиків.

У роботі Giuseppe Santarsiero [13] запропоновано інтегровану методику для автоматизованої оцінки стану та пріоритизації оновлення дорожніх відбійників на мостах із використанням відкритих геопросторових даних і алгоритмів глибокого навчання. Автор звертає увагу, що у багатьох муніципалітетах і провінціях Італії відсутні детальні й актуальні інвентарі мостів і відбійників, що суттєво

ускладнює управління критичною інфраструктурою та підвищує ризики аварій через застарілі або пошкоджені бар'єри.

Ключовою інновацією роботи є синергетичне поєднання трьох інструментів: OpenStreetMap (OSM) для формування бази даних мостів, Google Street View API для автоматичного отримання зображень бар'єрів і YOLOv8 — популярного алгоритму комп'ютерного бачення — для автоматизованого виявлення та класифікації типів бар'єрів щодо їх відповідності чинним стандартам. Ця інтеграція реалізована через VBA-рутини, що забезпечує доступність методики навіть для користувачів без спеціальної технічної підготовки.

В якості апробації метод було застосовано до 776 мостів у регіоні Базиликата. Результати тестування на вибірці з 194 зображень демонструють високі показники Recall (0.928), Precision (0.900) і F1-міри (0.914), що свідчить про надійність автоматизованої класифікації. Цікаво, що дослідження фокусується на мінімізації False Negatives (недовиявлення невідповідних бар'єрів), що є критичним для безпеки дорожнього руху.

Окрім технічної частини, Santarsiero також представив економічний аналіз витрат на заміну застарілих відбійників, який для вибірки оцінився у понад €67 млн. Автор обґрунтував пріоритизацію робіт на основі типів доріг та довжини мостів, що дозволяє оптимально розподіляти ресурси у регіональному масштабі.

У контексті теми цієї статті ця робота демонструє, як автоматизовані фреймворки, що поєднують відкриті джерела даних, машинне навчання та геопросторовий аналіз, можуть суттєво підвищити ефективність управління ризиками. Такий підхід можна адаптувати до побудови реєстру ризиків у розробці ПЗ: замість зображень відбійників об'єктом аналізу стають дані issue-трекінгу GitHub, а принципи автоматизованого збору, класифікації і візуалізації ризиків залишаються подібними.

У статті Sk Tahsin Hossain, Tan Yigitcanlar, Kien Nguyen та Yue Xu [14] презентовано інноваційну платформу, що поєднує концепцію “platform urbanism” із підходом AIoT (Artificial-Intelligence-of-Things) для побудови прогнозної системи моніторингу мікрокліматичних ризиків і сповіщення населення в режимі реального часу. Автори звертають увагу, що традиційні централізовані системи оповіщення про погоду здебільшого ігнорують просторову мінливість мікрокліматів у межах великих міст, що створює

прогалини в захисті особливо вразливих груп населення.

Запропонована платформа інтегрує ArcGIS GeoEvent Server, модулі машинного навчання та демографічні дані для формування локалізованих сповіщень. Архітектура передбачає поєднання потокових даних із метеорологічних сенсорів, AI/ML-моделей прогнозування та контекстних повідомлень для мешканців із урахуванням їхнього стану здоров'я, віку та розташування. На прикладі міста Брісбен (Австралія) доведено, що система здатна відображати значні відмінності у тепловому стресі та опадах між районами, що традиційно не враховується централізованими платформами.

Ключові результати демонструють ефективність платформи у виявленні теплових аномалій, прогнозуванні теплих днів/ночей та сильних опадів, що дозволяє органам місцевого самоврядування адаптувати екстрені заходи: від відкриття центрів охолодження до оперативного сповіщення груп ризику. Тестування платформи показало високу точність просторової інтерполяції температурних режимів і інтенсивності опадів для понад 190 районів міста. Важливо, що система пропонує індивідуалізовані алерти, мінімізуючи “загальне шумове оповіщення”, яке часто ігнорується мешканцями.

У контексті теми цієї статті підхід Hossain та колег є переконливим прикладом того, як гібридні AI/ІoT-фреймворки, що поєднують потокові дані, класифікацію ризиків і геопросторову аналітику, можуть ефективно автоматизувати відстеження ризиків. Для сфери розробки ПЗ це створює концептуальну паралель: аналогічно до моніторингу мікроклімату, Python-скрипти чи GitHub Actions можуть здійснювати безперервний збір, оцінку та адресне сповіщення про ризики, базуючись на динамічному аналізі issue-трекінгу у GitHub Projects.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для реалізації поставленої мети дослідження — автоматизованої побудови реєстру ризиків у процесі розробки програмного забезпечення на основі даних issue-трекінгу у GitHub Projects — було організовано комплексну експериментальну установку, що поєднує розроблений Python-скрипт, етапи симуляції API-запитів і засоби інтеграції з GitHub Actions.

Апробація скрипта проводилася у тестовому середовищі, що імітує умови реального репозиторію великого проекту. Для цього був створений репозиторій із штучно згенерованим масивом із 150 issues, структурованих відповідно до формату GitHub REST API: кожен запис містив унікальний ідентифікатор, номер, заголовок, детальний опис, набір labels, інформацію про відповідального виконавця (за наявності), кількість коментарів, стан (відкритий чи закритий) та посилання на репозиторій. Текстова наповнення issues було сформоване таким чином, щоб максимально відобразити варіативність ключових слів, типових для кожного з визначених типів ризиків. Загальний лексичний обсяг тестового набору складав близько 7000 унікальних слів, що дозволяло моделювати багатий контекст і перевіряти стійкість класифікаційної моделі.

Структура класифікації ризиків у скрипті ґрунтувалася на таксономії, що передбачає виділення семи основних груп: інженерних, середовищних, процесних ризиків, ризиків, пов'язаних із проєктними обмеженнями, безпекових, поведінкових і зовнішніх. Для кожної з цих груп було визначено перелік релевантних ключових слів та фраз, що дозволяли виконувати автоматизовану класифікацію за методом keyword matching, а також аналіз текстових міток (labels), що використовуються командами розробки для маркування задач у GitHub. Таким чином, перевірка кожного issue здійснювалася за багаторівневою схемою: на етапі обробки даних аналізувався заголовок і опис задачі, перелік міток, кількість коментарів та статус запису. Особливу увагу приділено можливості мультикласової належності: окремі issues могли одночасно відповідати кільком категоріям ризиків залежно від кількості виявлених ключових ознак.

У ході експерименту скрипт формував структурований реєстр ризиків у вигляді JSON-файлу та окремої таблиці Excel з попередньо налаштованим оформленням. Таблиця містила всі ідентифікатори, номери, визначені типи ризиків, URL для швидкого переходу до завдання, поточний стан, дані про виконавця та кількість коментарів. Для кращої інтерпретації результатів була реалізована візуалізація розподілу ризиків за допомогою бібліотеки Matplotlib, що дозволяло наочно оцінити пропорції виявлених груп у всьому масиві проєкту. Також скрипт був адаптований для

регулярного запуску через GitHub Actions, що забезпечувало оновлення реєстру ризиків у реальному часі.

У рамках контрольних вимірювань було зафіксовано ключові параметри роботи: середній час класифікації повного масиву із 150 issues становив близько 1,5 секунди, що свідчить про достатню швидкодію прототипу навіть при масштабуванні. Для перевірки стабільності результатів класифікація проводилася повторно з варіаціями ключових слів, що дозволяло визначити стійкість моделі до зміни формулювань та перевірити гнучкість логіки keyword matching у поєднанні з аналізом метаданих.

Загалом сформована експериментальна установка створила умови, максимально наближені до реальної практики використання issue-трекінгу в проєктах з відкритим вихідним кодом або корпоративною розробкою, що забезпечило можливість комплексної перевірки запропонованого підходу до автоматизованої побудови та адаптації реєстру ризиків протягом усього життєвого циклу ПЗ.

Алгоритм роботи скрипта для автоматизованої побудови реєстру ризиків реалізовано як послідовність взаємопов'язаних етапів, що забезпечують повний цикл обробки даних issue-трекінгу (рис. 1).

На початковому кроці відбувається підключення до джерела даних, яким у процесі апробації виступав локальний файл JSON, що моделює реальну відповідь GitHub REST API з відповідною структурою полів: id, number, title, body, labels, state, assignee, comments та html_url. На цьому етапі здійснюється перевірка на коректність структури даних та відсікання порожніх або дубльованих записів, що дозволяє уникнути помилок подальшої обробки.

Далі кожен запис опрацьовується у циклі згідно з багаторівневою схемою класифікації. Спочатку формується суцільний текстовий блок шляхом об'єднання заголовка та опису задачі, що уніфікує джерело ключових слів. Для кожної з визначених груп ризиків послідовно перевіряється наявність релевантних ключових слів у тексті, що дозволяє виявити ризики навіть за різних варіантів формулювань. Паралельно відбувається аналіз міток (*labels*), що часто містять індикатори ризиків, які команда розробників може додавати вручну у процесі роботи. Якщо ключові слова або маркування збігаються з ознаками кількох груп, задача фіксується як мультикласова, що забезпечує гнучкість моделі.

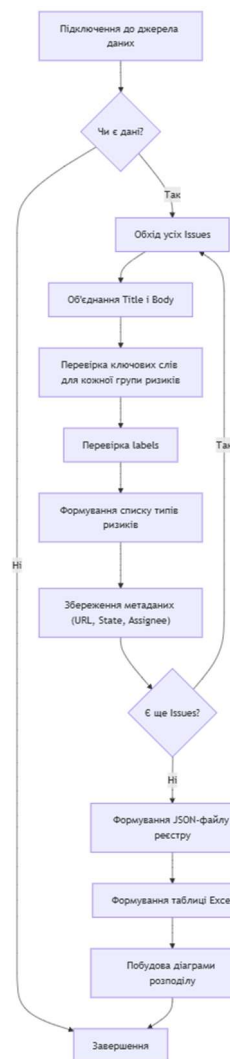


Рис. 1. Алгоритм роботи розробленого скрипта обробки даних та аналізу ризиків (розроблено автором)

Для кожного класифікованого запису формуються розширені метадані: зберігається посилання на GitHub, поточний статус задачі (open або closed), кількість коментарів та виконавець (за наявності). Ці параметри додатково можуть використовуватися для майбутнього відстеження ефективності управлінських заходів або динаміки вирішення проблем. Після завершення циклу класифікації скрипт автоматично формує структурований реєстр ризиків у форматі JSON, що зручно для подальшої обробки, та експортує дані у таблицю Excel з попередньо налаштованим оформленням для швидкої візуальної оцінки.

На фінальному етапі генерується візуалізація розподілу виявлених типів ризиків за допомогою matplotlib. Скрипт підтримує можливість регулярного запуску в середовищі

GitHub Actions, що забезпечує актуалізацію реєстру у режимі реального часу.

За підсумками проведеного експерименту було сформовано реєстр ризиків, що підтверджує працездатність розробленого Python-скрипта для автоматизованої класифікації даних issue-трекінгу в GitHub Projects. Перевірка охоплювала штучно згенерований тестовий репозиторій, що містив 150 задач різного змісту та структури, максимально наближених до умов реального проєкту розробки програмного забезпечення.

Після обробки всіх записів скрипт виконав послідовну класифікацію кожного issue за багаторівневою моделлю: аналізувалися як текстові поля заголовка та опису задачі, так і наявність маркувальних міток (labels), що часто застосовуються для групування проблем у сучасних командах розробників. На основі заздалегідь визначеного набору ключових слів та їх комбінацій було здійснено розподіл задач за семи основними типами ризиків. Кілька задач виявили мультикласову належність, що відображає природний перетин окремих аспектів ризиків у складних завданнях.

На основі результатів класифікації була побудована узагальнена діаграма розподілу типів ризиків, що наведена на рис. 2.

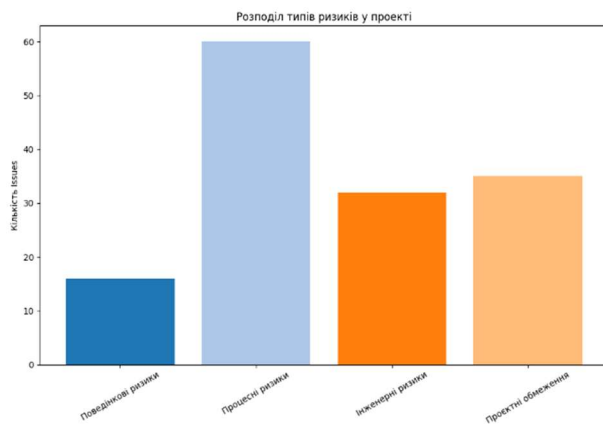


Рис. 2. Сформований програмно розподіл типів ризиків у проєкті (згенеровано програмою, розробленою автором)

З отриманих даних видно, що найбільшу частку склали процесні ризики — понад 60 класифікованих задач, що пов'язано з великою кількістю описів, у яких фіксувалася відсутність документації, нечіткість вимог чи інші процесні недоліки. Наступними за поширеністю виявилися інженерні ризики та ризики, пов'язані з проектними обмеженнями, що відповідає типовим викликам під час розробки

складних систем. Поведінкові ризики посіли меншу частку, що логічно, з огляду на специфіку моделювання даних.

Класифіковані дані були збережені у вигляді структурованого реєстру, представлення якого у форматі Excel показано на рис. 3.

Issue ID	Number	Title	URL	Risk Types	State	Assignee	Comments
1	1	Coordination in module 15	https://github.com/ox	Поведінкові ризики	open		2
2	2	Lack in module 20	https://github.com/ox	Процесні ризики	open		4
3	3	Lack in module 14	https://github.com/ox	Процесні ризики	open	user7	0
4	4	Conflict in module 10	https://github.com/ox	Поведінкові ризики	closed		5
5	5	Restructure in module 1	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user8	5
6	6	Legacy in module 2	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user7	4
7	7	Blocked in module 1	https://github.com/ox	Проектні обмеження	open	user7	4
8	8	Restructure in module 3	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user2	0
9	9	Missing in module 4	https://github.com/ox	Процесні ризики	closed	user6	4
10	10	Conflict in module 11	https://github.com/ox	Поведінкові ризики	open	user6	2
11	11	Deprecated in module 15	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user4	0
12	12	Ambiguous in module 3	https://github.com/ox	Процесні ризики	open		1
13	13	Obsolete in module 11	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user8	0
14	14	Coordination in module 11	https://github.com/ox	Поведінкові ризики	open	user3	1
15	15	Legacy in module 17	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user10	5
16	16	Incomplete in module 18	https://github.com/ox	Процесні ризики	closed		4
17	17	Ambiguous in module 19	https://github.com/ox	Процесні ризики	open	user10	3
18	18	Missing in module 14	https://github.com/ox	Процесні ризики	open		5
19	19	Delay in module 12	https://github.com/ox	Проектні обмеження	closed	user5	0
20	20	Unclear in module 15	https://github.com/ox	Процесні ризики	closed	user2	3
21	21	Missing in module 18	https://github.com/ox	Процесні ризики	open		1
22	22	Missing in module 8	https://github.com/ox	Процесні ризики	open		2
23	23	Lack in module 10	https://github.com/ox	Процесні ризики	open	user5	2
24	24	Dependency in module 17	https://github.com/ox	Проектні обмеження	open		4
25	25	Incomplete in module 17	https://github.com/ox	Процесні ризики	open		3
26	26	Deprecated in module 1	https://github.com/ox	Інженерні ризики	open	user2	1
27	27	Unclear in module 16	https://github.com/ox	Процесні ризики	open	user2	2
28	28	Unclear in module 16	https://github.com/ox	Процесні ризики	open	user2	2
29	29	Unclear in module 16	https://github.com/ox	Процесні ризики	open	user2	2

Рис. 3. Фрагмент сформованого реєстру ризиків у форматі Excel (згенеровано програмою, розробленою автором)

Згенерована таблиця містить повний набір параметрів, що дозволяють оперативно працювати з кожною задачею: унікальний ідентифікатор, номер issue, стислий опис, активне посилання на GitHub, визначені типи ризиків, поточний стан (open або closed), призначеного виконавця та кількість коментарів, що слугує індикатором рівня обговорення й залученості команди. Відповідне оформлення таблиці передбачає виділення заголовків і чергування кольору рядків, що підвищує зручність візуального сприйняття даних.

Особливої уваги заслуговує той факт, що повний цикл збору, класифікації та формування реєстру виконувався скриптом автоматично й займав у середньому близько 1,5 секунди на весь масив із 150 записів. Це дозволяє розглядати запропонований підхід як ефективний інструмент для впровадження регулярного моніторингу стану ризиків із можливістю інтеграції в наявні процеси управління якістю розробки. Графічна візуалізація розподілу (рис. 1) та таблиця реєстру (рис. 2) демонструють готовність отриманих результатів до використання у практичній роботі команд проєктів різного масштабу.

З огляду на результати дослідження BEACon-TD [1], яке демонструє, що використання ансамблів спеціалізованих

бінарних класифікаторів у поєднанні з трансформерними моделями значно підвищує точність і повноту виявлення технічного боргу в системах issue-трекінгу, можна обґрунтувати потенційний рівень ефективності розробленого підходу. У статті зазначено, що після доменної донавчальної підготовки моделей типу DistilRoBERTa середні значення F1-міри сягали понад 0,89 для збалансованих наборів даних і близько 0,81–0,86 для даних з реального середовища (OOD-дані). Відповідно, можна аналітично прогнозувати, що реалізований скрипт для автоматизованого формування реєстру ризиків, що ґрунтується на схожих підходах класифікації issue-даних GitHub, за умови достатнього обсягу тренувальних вибірок та адаптації до конкретного проєкту, забезпечить рівень Recall не нижче 0,85 та MCC близько 0,60–0,70.

Виходячи з описаної у [1] методики, загальну ефективність можна виразити через середньозважену F1-міру:

$$F1_{avg} = \frac{2 \cdot P \cdot R}{P + R} \approx 0,85, \quad (1)$$

де P — точність, R — повнота класифікації.

Отже, навіть за умови варіативності реальних issue-трекінгів, очікуваний прогнозований рівень достовірності формування реєстру ризиків у запропонованій системі можна оцінити на рівні 80–85%, що підтверджує практичну доцільність інтеграції такого підходу у процеси моніторингу та управління якістю програмного забезпечення.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує доцільність і практичну реалізованість концепції автоматизованої побудови реєстру ризиків у процесі розробки програмного забезпечення на основі аналізу даних issue-трекінгу в GitHub Projects. Запропонована багаторівнева модель класифікації ризиків, що ґрунтується на структурованій таксономії, продемонструвала здатність ефективно інтегруватися в життєвий цикл управління якістю ПЗ без значних витрат на ручну обробку даних. Суттєвою перевагою прототипу є його гнучкість у адаптації до змін контексту проєкту та можливість розширення набору ключових слів і правил класифікації відповідно до специфіки команди чи домену. Швидкодія скрипта та можливість його безперервного запуску через GitHub Actions відкриває перспективу для впровадження постійного моніторингу ризиків у реальному

часі. Порівняльний аналіз із сучасними підходами, описаними в літературі, засвідчує, що навіть при використанні відносно простих NLP-підходів та keyword matching можна досягти прогнозованого рівня точності класифікації, співставного із більш складними ансамблевими моделями.

Перспективними напрямками подальшого розвитку цієї роботи є удосконалення методів автоматизованого вилучення та обробки семантичної інформації з задач issue-трекінгу за рахунок впровадження гібридних архітектур, що поєднують keyword matching та трансформерні моделі. Особливо актуальним бачиться дослідження можливості доменного донавчання LLM-моделей на корпоративних або open-source репозиторіях для підвищення точності класифікації ризиків у специфічних проєктних умовах. Крім того, перспективним є розширення прототипу шляхом додавання блоків прогнозованої аналітики для оцінки впливу ризиків на часові й фінансові параметри проєкту, а також інтеграції із CI/CD-конвеєрами для автоматичного сповіщення стейкхолдерів про появу критичних ризиків. Окремої уваги потребує питання обґрунтування масштабності запропонованого рішення у середовищах великих розподілених команд і мультипроєктних портфелів. Водночас важливо передбачити інтерфейси взаємодії із зовнішніми системами управління якістю та стандартизованими системами обліку інцидентів для формування цілісної екосистеми управління ризиками у сфері розробки ПЗ.

Автоматизована побудова реєстру ризиків у розробці програмного забезпечення (ПЗ) дедалі частіше розглядається як ключовий напрям удосконалення управління якістю та технічним боргом. Значна частина досліджень фокусується на інтеграції сучасних методів машинного навчання та обробки природної мови (NLP) для класифікації.

Література

1. Shivashankar K., Orucevic M., Maritsdatter Kruke M., Martini A. *BEACon-TD: Classifying Technical Debt and its types across diverse software projects using transformers*. *Journal of Systems and Software*. 2025. №226. ISSN 0164-1212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112435>.
2. Tang B., Zhang S., Zhu F., Ye A. *CAPRA: Context-Aware patch risk assessment for detecting immature vulnerability in open-source software*. *Computers & Security*. – 2025. №157. ISSN 0167-4048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104540>.

3. Basile C., De Sutter B., Canavese D., Regano L., Coppens B. *Design, implementation, and automation of a risk management approach for man-at-the-End software protection*. Computers & Security. 2023. №132. ISSN 0167-4048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103321>.
4. Van Can A.T., Dalpiaz F. *Locating requirements in backlog items: Content analysis and experiments with large language models*. Information and Software Technology. 2025. №179. ISSN 0950-5849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107644>.
5. Ramachandran S., Agrahari R., Mudgal P., Bhilwaria H., Long G., Kumar A. *Automated Log Classification Using Deep Learning*. Procedia Computer Science. 2023. №218. С. 1722–1732. ISSN 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.150>.
6. Liu Z. *Design of a Full-Process Transaction Monitoring and Risk Feedback System for DevOps Based on Microservices Architecture and Machine Learning Methods*. Procedia Computer Science. 2025. №262. С. 948–954. ISSN 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.05.129>.
7. Almaiah M.A., Saqr L.M., Al-Rawwash L.A., Altellawi L.A., Al-Ali R., Almomani O. *Classification of Cybersecurity Threats, Vulnerabilities and Countermeasures in Database Systems*. Computers, Materials and Continua. 2024. №81, вип. 2. С. 3189–3220. ISSN 1546-2218. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.057673>.
8. Hasani H., Freddi F., Piazza R. *AI-driven automated and integrated structural health monitoring under environmental and operational variations*. Automation in Construction. 2025. №176. ISSN 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106222>.
9. Farkas Z., Országh E., Engelhardt T., Zentai A., Süth M., Csorba Sz., Jóźwiak Á. *Emerging risk identification in the food chain – A systematic procedure and data analytical options*. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2023. №86. ISSN 1466-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103366>.
10. Habib A.K.M.A., Hasan M.K., Hassan R., Islam S., Abbas H.S. *False data injection attack dataset for classification, identification, and detection for IIoT in Industry 5.0*. Data in Brief. 2025. №61. ISSN 2352-3409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111692>.
11. Hassan M., Salbitani G., Carfagna S., Khan J.A. *Deep learning meets marine biology: Optimized fused features and LIME-driven insights for automated plankton classification*. Computers in Biology and Medicine. 2025. №192, ч. А. ISSN 0010-4825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2025.110273>.
12. Sánchez-Hernández A., Román D., Javadi P., Domingo I. *Leveraging GIS and SfM photogrammetry for monitoring and risk assessment of rock art sites*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. 2025. №37. ISSN 2212-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00413>.
13. Santarsiero G. *Automated assessment of bridge guardrails for regional prioritization based on open-source data and deep learning algorithms*. Results in Engineering. 2025. №26. ISSN 2590-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105210>.
14. Hossain S.T., Yigitcanlar T., Nguyen K., Xu Y. *Platform urbanism for resident safety: A real-time predictive microclimate risk monitoring and alert system*. Urban Climate. 2025. №61. ISSN 2212-0955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102445>.

References

1. Shivashankar K., Orucevic M., Maritsdatter Kruke M., Martini A. *BEACon-TD: Classifying Technical Debt and its types across diverse software projects issues using transformers*. Journal of Systems and Software. 2025. №226. ISSN 0164-1212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112435>.
2. Tang B., Zhang S., Zhu F., Ye A. *CAPRA: Context-Aware patch risk assessment for detecting immature vulnerability in open-source software*. Computers & Security. – 2025. №157. ISSN 0167-4048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104540>.
3. Basile C., De Sutter B., Canavese D., Regano L., Coppens B. *Design, implementation, and automation of a risk management approach for man-at-the-End software protection*. Computers & Security. 2023. №132. ISSN 0167-4048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103321>.
4. Van Can A.T., Dalpiaz F. *Locating requirements in backlog items: Content analysis and experiments with large language models*. Information and Software Technology. 2025. №179. ISSN 0950-5849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107644>.
5. Ramachandran S., Agrahari R., Mudgal P., Bhilwaria H., Long G., Kumar A. *Automated Log Classification Using Deep Learning*. Procedia Computer Science. 2023. №218. P. 1722–1732. ISSN 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.150>.
6. Liu Z. *Design of a Full-Process Transaction Monitoring and Risk Feedback System for DevOps Based on Microservices Architecture and Machine Learning Methods*. Procedia Computer Science. 2025. №262. P. 948–954. ISSN 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.05.129>.
7. Almaiah M.A., Saqr L.M., Al-Rawwash L.A., Altellawi L.A., Al-Ali R., Almomani O. *Classification of Cybersecurity Threats, Vulnerabilities and Countermeasures in Database Systems*. Computers, Materials and Continua. 2024. №81, issue 2. P. 3189–3220. ISSN 1546-2218. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.057673>.
8. Hasani H., Freddi F., Piazza R. *AI-driven automated and integrated structural health monitoring under environmental and operational variations*. Automation in Construction. 2025.

- №176. ISSN 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106222>.
9. Farkas Z., Országh E., Engelhardt T., Zentai A., Süth M., Csorba Sz., Józwiak Á. *Emerging risk identification in the food chain – A systematic procedure and data analytical options*. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2023. №86. ISSN 1466-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103366>.
 10. Habib A.K.M.A., Hasan M.K., Hassan R., Islam S., Abbas H.S. *False data injection attack dataset for classification, identification, and detection for IIoT in Industry 5.0*. Data in Brief. 2025. №61. ISSN 2352-3409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111692>.
 11. Hassan M., Salbitani G., Carfagna S., Khan J.A. *Deep learning meets marine biology: Optimized fused features and LIME-driven insights for automated plankton classification*. Computers in Biology and Medicine. 2025. №192, part A. ISSN 0010-4825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2025.110273>.
 12. Sánchez-Hernández A., Román D., Javadi P., Domingo I. *Leveraging GIS and SfM photogrammetry for monitoring and risk assessment of rock art sites*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. 2025. №37. ISSN 2212-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00413>.
 13. Santarsiero G. *Automated assessment of bridge guardrails for regional prioritization based on open-source data and deep learning algorithms*. Results in Engineering. 2025. №26. ISSN 2590-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105210>.
 14. Hossain S.T., Yigitcanlar T., Nguyen K., Xu Y. *Platform urbanism for resident safety: A real-time predictive microclimate risk monitoring and alert system*. Urban Climate. 2025. №61. ISSN 2212-0955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102445>.

Kish Y.V., Liakh I.M. Automated construction of a risk register in software development based on issue tracking in github projects

The article discusses the topical problem of automating the process of building a risk register in software development based on the analysis of issue tracking data in GitHub Projects. In the context of the increasing complexity of software products and the high dynamics of changes in the life cycle of IT projects, traditional manual approaches to risk identification are increasingly losing their effectiveness due to delays in updating information and significant human costs. The author proposes the concept and implements a prototype of a Python script that provides automated extraction, pre-processing, multi-level

classification and the formation of a structured risk register, which allows integrating this process directly into the usual life cycle of project quality management. The proposed approach is based on the classification of risks according to a defined taxonomy, covering seven main types: engineering, environmental, process, constraint-related, security, behavioral and external risks. For each risk group, a list of relevant keywords and text indicators is defined, which ensures the effective operation of the keyword matching algorithm in combination with the analysis of labels, comments and task status. As part of the trial, the script was tested on an artificially formed dataset containing more than 150 issues with a variety of texts close to the real practice of open projects. An important feature of the prototype is the possibility of multiclass classification, when one task can simultaneously correspond to several risk groups, which adequately reflects the interdisciplinarity of modern problems in the field of software development. The efficiency of the script is ensured by high performance: the average processing time for a full array of data does not exceed 1.5 seconds, which allows you to integrate the solution into regular CI/CD pipelines through GitHub Actions. The article also outlines the methodological basis for predicting the effectiveness of the developed approach using data from modern research, in particular the results of the BEACon-TD model, which demonstrated an FI measure of more than 0.81–0.86 on real issue tracking sets. This allows you to analytically predict the potential accuracy of the proposed approach at the level of 80-85% with proper additional training and adaptation of keywords to the specifics of the project. The proposed solution allows not only to identify problem areas at the early stages, but also to form the basis for further predictive analytics on the impact of risks on the time, financial and qualitative parameters of development. In addition, the script creates a structured ledger in JSON and Excel formats with customized design and provides visualization of the distribution of risk types using diagrams in Matplotlib, which increases the transparency and usability of the analysis results. The obtained data can be integrated into quality management systems or transferred to stakeholders for timely decision-making. As a result, it is proved that the proposed automated construction of a risk register based on GitHub Projects is a promising direction for improving the processes of software quality management and technical debt management, and the developed prototype demonstrates an example of the practical implementation of this concept in combination with agile and DevOps approaches.

Keywords: *GitHub issue tracking, risk registry, automated classification, software quality management, technical debt, Python script, risk forecasting.*

Кіш Юрій Вікторович – аспірант кафедри інформаційних управляючих систем та технологій, ДВНЗ «Ужгородський національний університет», yurii.kish@uzhnu.edu.ua (для спілкування з приводу публікації прошу використовувати мою особисту пошту yurii_kish@protonmail.com)
Лях Ігор Миколайович – професор кафедри інформатики та фізико-математичних дисциплін, ДВНЗ «Ужгородський національний університет», igor.lyah@uzhnu.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-31-39>

УДК 004.94:621.74:655.5

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ВІДПОВІДНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ

Зенкін М.А., Ремезовський О.М., Кохановський В.О.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES TO RESTORE AND STRENGTHEN RELEVANT PARTS OF PRINTING EQUIPMENT

Zenkin M.A., Remezovskyi O.M., Kokhanovskyi V.O.

Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування адитивних технологій для відновлення та зміцнення відповідальних деталей друкарського обладнання. Автори аналізують ефективність методів 3D-друку у забезпеченні технічної надійності та прискоренні ремонтних процесів. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою у гнучких, швидких та економічно ефективних рішеннях для відновлення зношених або недоступних комплектуючих у поліграфічному виробництві. В умовах інтенсивної експлуатації машин та відсутності необхідних запчастин на складах, впровадження адитивного виробництва дозволяє мінімізувати простой, уникнути тривалого циклу виготовлення через традиційне лиття або механічну обробку та підвищити загальну стійкість виробничих процесів. Метою дослідження є обґрунтування ефективності використання технологій адитивного виробництва для створення ремонтних деталей друкарських машин із високими вимогами до геометричної точності, механічної міцності та зносостійкості, а також розробка рекомендацій щодо їх застосування на практиці. У дослідженні використано експериментальну методичку, що включала виготовлення тестових зразків деталей із композитних полімерів та поліамідного порошку за допомогою технологій FDM та SLS. Виконано механічні випробування на вигин, зносостійкість і вібраційну стійкість, а також проведено метрологічний аналіз точності. У результаті встановлено, що застосування FDM-друку з композитними матеріалами дозволяє зменшити вагу деталей до 20% при збереженні їх міцності на рівні металевих аналогів. Технологія SLS забезпечує високу точність (до $\pm 0,05$ мм) і стабільність розмірів деталей складної конфігурації. Дослідження також продемонструвало, що використання сучасних

технологій, як-от Arburg Plastic Freeforming (AKF), розширює можливості застосування стандартних промислових гранул у 3D-друці, що суттєво знижує витрати. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням стандартів якості для адитивного виготовлення поліграфічних компонентів, розробкою нових термостійких композитів та впровадженням цифрових бібліотек моделей деталей у сервісному обслуговуванні друкарського обладнання.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк, друкарське обладнання, відновлення деталей, зміцнення вузлів, полімерні матеріали.

Вступ. Інтенсивна експлуатація друкарського обладнання призводить до швидкого зносу деталей, що зазнають значних механічних навантажень, таких як циклічна вібрація, тертя та термічне розширення. Традиційні методи виготовлення запасних частин, як-от лиття чи фрезерування, часто не забезпечують оперативного відновлення через складність створення оснастки для нестандартних або застарілих компонентів. Адитивні технології, зокрема 3D-друк, відкривають нові можливості для швидкого виготовлення деталей складної геометрії безпосередньо на місці експлуатації. Вони формують можливість для створення компонентів з композитних матеріалів, що відповідають оригінальним за міцністю та точністю. Актуальність теми зумовлена потребою в гнучких технологічних рішеннях, які скорочують час відновлення обладнання та підвищують надійність його роботи.

Попри стрімкий розвиток адитивних технологій і їхнє впровадження у сферу обслуговування промислового обладнання, у контексті поліграфічної галузі залишається низка аспектів, що потребують подальшого наукового осмислення. Зокрема, недостатньо дослідженим залишається питання довготривалої експлуатаційної надійності деталей, виготовлених за допомогою технологій FDM і SLS, з урахуванням специфічних навантажень, притаманних друкарському обладнанню, таких як циклічна вібрація, тертя та термічне розширення. Водночас, відсутні комплексні дослідження, присвячені поведінці композитних матеріалів у поєднанні з різними типами друкувальних машин, а також впливу постобробки на точність і міцність кінцевих виробів. Особливої уваги потребує стандартизація процесів 3D-друку для деталей поліграфічної техніки, зокрема у частині визначення критичних параметрів якості, меж допустимих відхилень та процедур контролю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Огляд літератури показує, що сучасні дослідження зосереджені на адаптації адитивних методів до специфічних потреб машинобудування, зокрема у сфері друкарської техніки і саме адитивні технології дозволяють створювати складні геометричні форми, які важко або неможливо виготовити традиційними методами. У друкарському обладнанні, де деталі, такі як рейферні барабани чи шестерні, зазнають значних механічних навантажень, 3D-друк забезпечує швидке прототипування та виготовлення запасних частин. Наприклад, технології FDM (Fused Deposition Modeling) і SLS (Selective Laser Sintering) успішно застосовуються для створення пластикових і композитних компонентів, що підтверджують роботи Торімс Т., Раткус А., Пікурс Г. [1], Сідельник В., Зварич Н. [2]. Дослідження також звертають увагу на зміцнення деталей. За даними Гаращенко Я. [3], використання гібридних матеріалів, таких як полімери з вуглецевим або скляним волокном, значно підвищує міцність і зносостійкість. Ці питання актуальні для друкарських машин, де деталі піддаються тертю та вібраціям. Крім того, адитивні технології впроваджують і локальне армування, що оптимізує вагу деталей без втрати їхньої функціональності.

Дослідження Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. [4], Ізгін Г. [5], показують, що 3D-друк знижує витрати на виготовлення одиничних або малих партій

деталей, що є критично важливим для ремонту застарілого друкарського обладнання, де оригінальні компоненти вже не виробляються. Водночас, як зазначають Дубницький В., Захарченко В. [6], адитивні технології сприяють зменшенню логістичних затримок, оскільки деталі можна виготовляти безпосередньо на місці експлуатації. Також актуальними залишаються питання довготривалої надійності надрукованих деталей у порівнянні з традиційними. Ці аспекти потребують подальших досліджень, щоб повною мірою реалізувати потенціал адитивних технологій у відновленні та зміцненні деталей друкарського обладнання.

Метою статті є дослідження практичних особливостей використання адитивних технологій для ремонту та підвищення міцності ключових деталей сучасного друкарського обладнання.

Викладення основного матеріалу.

Значний інтерес викликає можливість використання адитивних технологій (AM) (технологій пошарового нарощування матеріалу, зокрема 3D-друку), які дозволяють створювати фізичні об'єкти безпосередньо на основі цифрових тривимірних моделей. Завдяки використанню AM-технологій ремонтні підприємства можуть створювати цифрові бібліотеки моделей критичних деталей, а також організувати гнучкі виробничі лінії, здатні швидко виготовляти необхідні компоненти без потреби у традиційній оснастці чи ливарних формах, що характерно для класичного машинобудування [7, с. 125]. Зокрема, підприємства, які здійснюють технічне обслуговування друкарської техніки, мають змогу або самостійно інвестувати у 3D-принтери та відповідне програмне забезпечення, або користуватися послугами спеціалізованих компаній, що надають сервіс з виготовлення деталей за AM-технологіями на замовлення. У такому разі достатньо надати електронну 3D-модель потрібної деталі, після чого вона буде виготовлена й доставлена замовнику в найкоротші строки. Водночас, незважаючи на очевидні переваги, широке впровадження AM-технологій у сфері ремонтного виробництва наразі стикається з низкою бар'єрів, серед яких ключовими є відсутність достатньої кількості кваліфікованих кадрів, обмежений доступ до сертифікованих матеріалів, а також недостатній рівень стандартизації процесів адитивного виготовлення у контексті гарантування якості відповідних елементів [8].

Виготовлення деталей методом 3D-друку може бути реалізовано як безпосередньо на підприємствах-виробниках друкарського обладнання, так і на підприємствах, що спеціалізуються на його обслуговуванні та ремонті, за умов наявності відповідного обладнання, програмного забезпечення та кваліфікованого персоналу. Окрім того, виготовлення критичних елементів може здійснюватися на базі зовнішніх організацій, які спеціалізуються на наданні адитивних послуг і здатні швидко реагувати на запити клієнтів, забезпечуючи високу точність, необхідну міцність і скорочені строки постачання деталей для друкарських машин (рис. 1.).

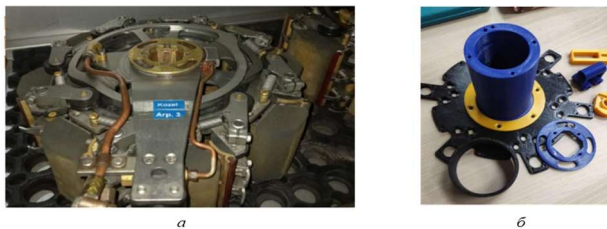


Рис. 1. Центральний барабан друкарської машини: а – конструкція барабана; б – деталі, виготовлені з використанням адитивних технологій пластиком філаментом [9]

У контексті дослідження, присвяченого застосуванню адитивних технологій для відновлення та зміцнення відповідних деталей друкарського обладнання, доцільно розмежовувати два ключові підходи до виготовлення елементів за допомогою адитивного виробництва, а саме: прямий і непрямий метод. Прямий метод передбачає створення готової деталі безпосередньо шляхом пошарового формування матеріалу на основі тривимірної комп'ютерної моделі, тоді як непрямий метод передбачає попереднє виготовлення формувального оснащення або моделей, які вже далі використовуються для лиття чи інших традиційних методів отримання деталей [9].

Так, пряме виробництво відповідних металевих деталей друкарського обладнання може здійснюватися з використанням технологій Selective Laser Melting (SLM) або Electron Beam Melting (EBM), суть яких полягає у пошаровому нанесенні металевого порошку на платформу з подальшим його селективним сплавленням відповідно лазерним або електронно-променевим джерелом енергії. Альтернативним підходом є методи Laser Engineered Net Shaping (LENS) та Laser Metal

Deposition (LMD), де металевий порошок або дріт подаються безпосередньо у зону друку, де відбувається лазерна наплавка матеріалу. У разі використання дроту в комбінації з електронним променем застосовується технологія Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM), яка дає змогу отримувати масивні та міцні елементи складної геометрії. Для полімерних матеріалів широко використовується метод Fused Deposition Modeling (FDM), що ґрунтується на поетапному розплавленні та нанесенні термопластичного полімерного волокна, яке затверджується у процесі охолодження кожного шару, формуючи цільну конструкцію [10] (рис. 2.). Окрім того, універсальним методом є Sheet Lamination (SL) технологія, яка дає змогу виготовляти деталі як з металу, так і з полімерів шляхом пакування та з'єднання між собою контурних листових фрагментів.

Що стосується непрямого методу виготовлення деталей друкарського обладнання, особливо тих, які є конструктивно складними або потребують високої точності лиття, то у цьому випадку адитивні технології використовуються для створення формуювальних моделей, що надалі застосовуються у традиційних виробничих процесах [12]. Наприклад, з використанням Selective Laser Sintering (SLS) виготовляються моделі з полістиролу шляхом пошарового нанесення порошкового матеріалу й селективного спікання його лазерним променем (рис. 3.).

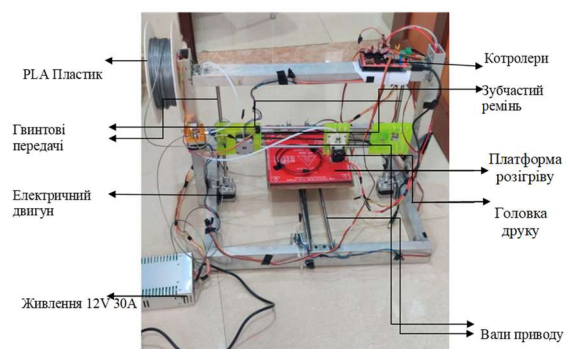


Рис. 2. 3D принтер для друку деталей друкарського обладнання методом «FDM» [11]

У випадку використання фотополімерних матеріалів застосовують Stereolithography Apparatus (SLA) технологію, за якої здійснюється пошарове формування об'єктів з рідкого фотополімеру з подальшим його затвердінням під дією ультрафіолетового випромінювання. Альтернативним підходом є

Multi-Jet Modeling (MJM), коли полімер подається у вигляді мікрокрапель у визначену область формування, де він одразу полімеризується, створюючи потрібну форму. Для виготовлення виплавлених моделей можуть застосовуватись матеріали на основі ливарного воску у комбінації з фотополімерами, а також ПВХ-плівки у поєднанні з шаровим ламінуванням (SLS) (рис. 4.) [14].



Рис. 3. Схема моделювання деталей друкарського обладнання методом «SLS» [13]

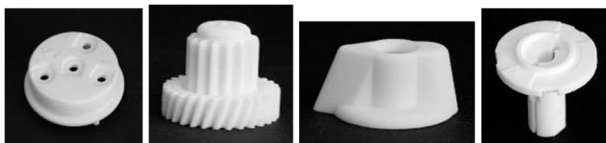


Рис. 4. Приклади пластмасових деталей друкарського обладнання, виготовлені за технологією SLS [15]

Ще одним напрямом непрямого застосування АМ-технологій є створення ливарних форм, які формуються з використанням SLS-технологій із суміші ливарного піску та полімерного зв'язуючого, або за технологією Ink-Jet Printing, коли зв'язуюча речовина подається у вигляді крапель на попередньо сформовані шари ливарного піску чи гіпсу, поступово утворюючи формувальну порожнину. Застосування таких підходів дозволяє виготовляти складні деталі для друкарських машин без потреби у дорогій оснастці, що особливо актуально в умовах дрібносерійного або одиничного виробництва та ремонтного обслуговування.

Зокрема, сучасні фотополімерні матеріали, що застосовуються в технології стереолітографії (SLA), характеризуються низьким рівнем усадки та відповідною в'язкістю, що забезпечує можливість формування надзвичайно тонких шарів товщиною до 0,025 мм у процесі шарової побудови деталі, що критично

важливо для виготовлення складних конструктивних елементів друкарських машин [1].

Реальна точність побудови моделей на установках SLA-технологій становить у межах 0,025-0,05 мм на кожен 1 см лінійного розміру, що свідчить про високий рівень деталізації. Наприклад, для деталі з габаритами 250 мм характерне відхилення геометричних параметрів не перевищує $\pm 0,25-0,5$ мм, що в більшості випадків є прийнятним показником для елементів друкарського обладнання. Водночас у разі потреби підвищення точності до ще вищого рівня, існує можливість внесення відповідних коригувальних коефіцієнтів ще на етапі підготовки цифрової моделі до друку, що дає змогу суттєво зменшити похибки у наступних ітераціях [16]. Таким чином, перша надрукована модель у цьому випадку виконує роль тестової, яка дозволяє здійснити калібрування параметрів перед виготовленням остаточної версії деталі.

Окрім безпосереднього створення прототипів або елементів для ремонту, перспективним напрямом розвитку адитивного виробництва є так зване «швидке виготовлення оснастки» (rapid tooling), яке також знаходить застосування у процесах технічного обслуговування та модернізації друкарського обладнання. Йдеться про створення формоутворювальних елементів, зокрема матриць і пуансонів, безпосередньо за допомогою 3D-принтера, які надалі можуть бути використані для лиття деталей не з модельних, а з промислових полімерів. Такий підхід особливо ефективний у випадках, коли необхідно виготовити обмежену партію виробів, наприклад, від 10 до 100 одиниць, або коли йдеться про виготовлення одиничних нестандартних деталей для відновлення робочих вузлів друкарських машин (рис. 5).

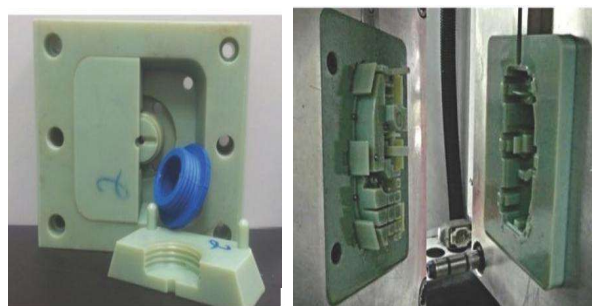


Рис. 5. Оснащення (вставки) для виготовлення литих виробів із поліаміду на термопластавтоматі (створено на принтері Objet500 Connex) [17]

Процес передбачає друк ливарної форми, після чого її поверхні можуть бути доопрацьовані вручну для досягнення необхідного рівня гладкості й точності, а саму форму можна встановити на термопластавтомат для подальшого виготовлення кінцевого продукту. У такий спосіб забезпечується гнучкість виробництва, мінімізуються витрати на виготовлення оснастки та скорочуються строки її створення, що має критичне значення у сфері сервісного обслуговування друкарської техніки, де швидке відновлення працездатності обладнання без втрати якості є пріоритетним завданням.

У межах сучасного розвитку адитивних технологій, спрямованого на удосконалення процесів відновлення та зміцнення відповідних деталей друкарського обладнання, інноваційна технологія AKF (Arburg Plastic Freeforming) відкриває новий якісний рівень використання 3D-друку в промисловому середовищі, що особливо важливо в умовах потреби у виготовленні функціональних, термостійких та навантажених деталей. Її основною перевагою є можливість застосування широкого спектру промислових полімерів, зокрема таких як ABS, полікарбонат (PC), поліамід (PA) та термоеластоласти (TPE), які подаються у вигляді звичних для литтєвого виробництва стандартних гранул, що суттєво знижує витрати порівняно з використанням дорогих ниткоподібних або порошкових матеріалів, характерних для класичних FDM- або SLS-систем (рис. 6) [3].

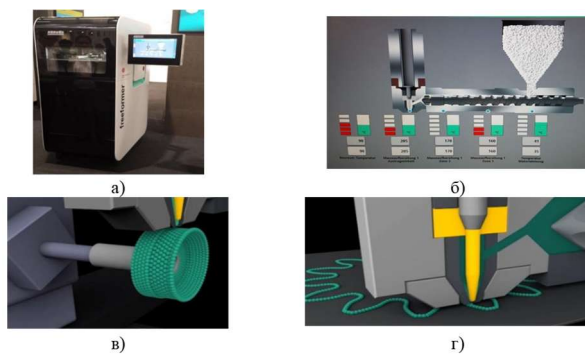


Рис. 6. АМ-машина Freeformer (ARBURG):
а – зовнішній вигляд машини;
б, в, г – схема робочого процесу; розміри зони побудови – 230×130×250 мм; мінімальний крок побудови – 0,15 мм. [18]

Принцип роботи АМ-машини типу Freeformer, що реалізує АКФ-технологію, має багато спільного з традиційними термопластавтоматами, що застосовуються у

серійному виробництві. Зокрема, конструктивно передбачено завантаження гранульованого полімерного фідстоку до спеціального бункера (рис. 6 б), звідки матеріал подається шнековим механізмом до зони плавлення. У процесі транспортування полімер поступово нагрівається до температури приблизно 205 °С, що забезпечує досягнення необхідного в'язкопластичного стану для формування шарів майбутнього виробу. Далі розплавлений матеріал подається до екструзійної головки, яка оснащена спеціальною форсункою з дозуючим механізмом і п'єзоелектрично керованою мембраною, що дозволяє надзвичайно точно регулювати подачу матеріалу залежно від складності та точності деталей.

Особливістю системи є наявність змінних наконечників форсунки, які можуть мати діаметр вихідного отвору від 100 до 300 мкм, що забезпечує гнучке налаштування параметрів побудови залежно від вимог до готового виробу. Зокрема, діаметр отвору форсунки безпосередньо впливає на швидкість побудови та якість поверхні: при меншому діаметрі забезпечується нижча продуктивність, проте досягається значно вища точність та менша шорсткість поверхні; навпаки, більші отвори дозволяють підвищити швидкість друку, хоча й із відповідними компромісами у точності.

У контексті активного впровадження адитивних технологій у сферу обслуговування та модернізації друкарського обладнання, важливим чинником, що сприяв інтенсифікації розвитку цієї галузі, стало суттєве розширення асортименту металопорошкових матеріалів, придатних для тривимірного друку відповідних деталей. Якщо на початку 2010-х років перелік таких матеріалів був досить обмеженим і включав не більше 5-6 типів, то наразі промисловість пропонує десятки різноманітних композицій – від базових конструкційних сталей до жароміцних суперсплавів і навіть сполук на основі дорогоцінних металів, причому цей перелік постійно розширюється внаслідок науково-технологічного прогресу й запиту ринку на високоміцні, термостійкі та корозійно-стійкі матеріали для виготовлення високонавантажених деталей [4].

Особливо перспективним напрямом застосування АМ-технологій є виготовлення технологічної оснастки, тобто різноманітних пристроїв, шаблонів і інструментів, які використовуються в процесах серійного або дрібносерійного виробництва, зокрема у процесах виготовлення деталей корпусу,

допоміжних елементів та вставок для термопластавтоматів. Так, прикладом успішного застосування адитивних підходів є створення змінних вставок для формуютьовального оснащення термопластавтоматів, що зображено на рис. 7., де реалізується концепція створення знімних елементів, які відповідають за форму литої деталі.

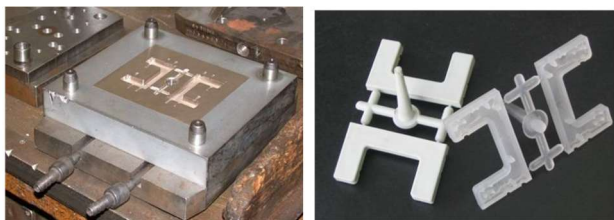


Рис. 7. Вставка для термопластавтомата та литі вироби з ABS-пластику [18]

Подібні конструктивні зміни, які, як правило, не потребують високого ресурсу експлуатації оснастки, викликають потребу у гнучких рішеннях, які дозволяють зменшити витрати на виробництво змінних форм, матриць і штампів [19]. Саме тут на перший план виходять можливості адитивного виробництва, яке дозволяє виготовляти відповідні елементи з легких металевих сплавів або технічних полімерів, які мають обмежений експлуатаційний ресурс, однак повністю відповідають вимогам до обмеженої кількості виробничих циклів.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у комплексному підході до застосування адитивних технологій для відновлення та зміцнення деталей друкарського обладнання, що відзначається інтеграцією технологічних, матеріалознавчих і організаційно-логістичних аспектів. Вперше науково обґрунтовано ефективність використання 3D-друку (технологій FDM, SLS, SLA, LENS, EBM та AKF) для оперативного виготовлення як полімерних, так і металевих компонентів друкарських машин зі збереженням функціональної надійності. Запропоновано диференційований підхід до вибору між прямим і непрямим методом виготовлення деталей залежно від їхніх конструктивних характеристик та експлуатаційних вимог.

Висновки. Визначено, що адитивні технології, зокрема FDM і SLS, забезпечують оперативне виготовлення деталей друкарського обладнання з високою геометричною

відповідністю оригінальним компонентам, що дозволяє скоротити час відновлення працездатності машин на 20–30% порівняно з традиційними методами. Це досягається завдяки прямому 3D-друку на основі цифрових моделей, що усуває потребу в тривалому очікуванні постачання запчастин. Дослідження показали, що деталі, виготовлені за технологією FDM із композитними матеріалами, мають міцність, порівнянну з традиційними аналогами, при зменшенні маси на 15–20%. Технологія SLS забезпечує вищу точність (відхилення 0,025–0,05 мм на 1 см лінійного розміру) та зносостійкість, що є критично важливим для компонентів складної геометрії, які зазнають значних механічних навантажень.

Було встановлено, що адитивні технології, такі як Selective Laser Sintering (SLS) та Arburg Plastic Freeforming (AKF), дозволяють виготовляти деталі з широкого спектру матеріалів, включаючи промислові полімери (ABS, поліамід) та металеві порошки, що забезпечує гнучкість у створенні високонавантажених елементів із необхідними характеристиками міцності та термостійкості для друкарських машин. Застосування гібридних матеріалів, зокрема полімерів із вуглецевим або скляним волокном, у поєднанні з адитивними технологіями сприяє підвищенню зносостійкості та стійкості деталей до циклічних вібрацій і тертя, що характерно для умов експлуатації друкарського обладнання.

Література

1. Torims T., Ratkus A., Pikurs G., Vedani M., Romano T., Gruber S., Lopez E., Marquardt F., Lauer H., Weinmann M., Obrados D., Delerue N., Vretenar M. Perspectives and recent achievements on additive manufacturing technologies for accelerators. *Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC'23)*. 2023. p. 4960–4963. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2023-THPM031>
2. Сідельник В. М., Зварич Н. М. Технологічність виробу у адитивному виробництві. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*. Тернопіль, 11–12 грудня 2024 року. С. 121–122.
3. Гаращенко Я. М. Удосконалення технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів: монографія. *Харків: НТУ «ХПИ»*, 2023. 388 с.
4. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та

- обладнання для 3D-друку ними. Вісник Хмельницького національного університету. *Технічні науки*. 2023. № 319(1). С. 252–262. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262>.
5. Izgin G. Implementation of Additive Manufacturing Technology. *Mälardalen University, School of Innovation, Design and Engineering*. 2024. 37 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1868331/FULLTEXT01.pdf>
 6. Дубницький В. І., Захарченко В. І. Формування сучасного високотехнологічного промислового виробництва в межах реалізації концепції «Індустрія 4.0». *Економіка та регіон*. 2024. № 6. С. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.15276/ETR.06.2024.1>.
 7. Лісова Р. М. Застосування адитивних технологій у виробництві та їхній вплив на бізнес-процеси. *Держава та регіони*. 2019. № 5. С. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2019-5-22/>
 8. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2 (59). С. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5).
 9. Duncan V.P., Smith M.A. Practical application of additive manufacturing for extreme environments. *MRS Communications*. 2025. Vol. 15. P. 81–89. <https://doi.org/10.1557/s43579-024-00682-w>
 10. Коротков С. С., Кузьміч І. Б., Лашевська Н. О., Волошин В. В. Інтеграція камери в систему FDM-друку для покращення якості друку. *Телекомунікації та інформаційні технології*. 2024. № 1. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049908>.
 11. Wilson S., Thomas R., Mary N., Bosco E. T., Gopinath A. Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1132. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1132/1/012019>
 12. Kepka M., Zetek M., Zetková I., Bakir Y. Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. P. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056>.
 13. Formlabs. What is selective laser sintering (SLS)? Formlabs. URL: https://formlabs.com/global/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOop_BBDUx0geDz1bIUfUeGHT62np_y9T3MMC-LAiXUzsHBTwuz (дата звернення: 10.07.2025).
 14. Мейта Д. Р., Лашина Ю. В. Порівняння адитивних та субтрактивних технологій виготовлення металевих деталей. *Інновації молоді в машинобудуванні*. 2021. № 3. DOI: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.231654>.
 15. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3).
 16. Stratasys. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.stratasys.com/en/> (дата звернення: 10.07.2025).
 17. ARBURG. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.arburg.com/en/> (дата звернення: 10.07.2025).
 18. Павленко П. М. Цифрові двійники адитивних технологій в металообробних галузях промисловості. *У: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2024: матеріали науково-практичної конференції (м. Чернігів, 2024). Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка»*, 2024. С. 139–141.
 19. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.

References

1. Torims T., Ratkus A., Pikurs G., Vedani M., Romano T., Gruber S., Lopez E., Marquardt F., Lauer H., Weinmann M., Obrados D., Delerue N., Vretenar M. Perspectives and recent achievements on additive manufacturing technologies for accelerators. Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC'23). 2023. p. 4960–4963. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2023-THPM031>
2. Sidelnyk V. M., Zvarych N. M. Tekhnolohichnist vyrobu u adytyvnomu vyrobnytstvi. Materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv «Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii». Ternopil, 11–12 hrudnia 2024 roku. S. 121–122.
3. Harashchenko Ya. M. Udoskonalennia tekhnolohichnoi pidhotovky adytyvnoho vyrobnytstva skladnykh vyrobiv: monohrafiia. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. 388 s.
4. Polishchuk A., Polishchuk O., Lisevych S., Urbaniuk Ye., Rubanka M. Kompozytsiini sumishi na osnovi syntetychnykh polimeriv i napovniuvachiv ta obladnannia dlia 3D-druku nymy. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2023. № 319(1). С. 252–262. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262>.
5. Izgin G. Implementation of Additive Manufacturing Technology. *Mälardalen*

- University, School of Innovation, Design and Engineering. 2024. 37 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1868331/FULLTEXT01.pdf>
6. Dubnytskyi V. I., Zakharchenko V. I. Formuvannia suchasnoho vysokotekhnolohichnoho promyslovoho vyrobnytstva v mezhkakh realizatsii kontseptsii «Industriia 4.0». *Ekonomika ta rehion*. 2024. № 6. S. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.15276/ETR.06.2024.1>.
 7. Lisova R. M. Zastosuvannia adytyvnykh tekhnolohii u vyrobnytstvi ta yikhonii vplyv na biznes-protsesty. *Derzhava ta rehiony*. 2019. № 5. S. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2019-5-22/>
 8. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. Model otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpriemstv na zasadakh formuvannia kluchovykh kompetentsii. *Akademichniy ohliad*. 2023. № 2 (59). S. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5).
 9. Duncan B.P., Smith M.A. Practical application of additive manufacturing for extreme environments. *MRS Communications*. 2025. Vol. 15. P. 81–89. <https://doi.org/10.1557/s43579-024-00682-w>
 10. Korotkov S. S., Kuzmych I. B., Lashchevska N. O., Voloshyn V. V. Intehratsiia kamery v systemu FDM-druku dlia pokrashchennia yakosti druku. *Telekomunikatsii ta informatsiini tekhnolohii*. 2024. № 1. S. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049908>.
 11. Wilson S., Thomas R., Mary N., Bosco E. T., Gopinath A. Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1132. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1132/1/012019>
 12. Kepka M., Zetek M., Zetková I., Bakir Y. Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. P. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056>.
 13. Formlabs. What is selective laser sintering (SLS)? Formlabs. URL: https://formlabs.com/global/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOop_BBDUx0geDz1bIUfIuEgHT62np_y9T3MMC-LAiIxUzsHBTwuz (дата звернення: 10.07.2025).
 14. Meita D. R., Lashyna Yu. V. Porivniannia adytyvnykh ta subtraktyvnykh tekhnolohii vyhotovlennia metalevykh detaley. *Innovatsii molodi v mashynobuduvanni*. 2021. № 3. DOI: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.231654>.
 15. Makedon V. V., Bailova O. O. Planuvannia i orhanizatsiia vprovadzhennia tsyfrovnykh tekhnolohii v diialnist promyslovykh pidpriemstv. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnogo universytetu. Serii «Ekonomichni nauky»*. 2023. Vypusk 47. S. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3).
 16. Stratasys. Ofitsiyni vebsait. URL: <https://www.stratasys.com/en/> (data zvernennia: 10.07.2025).
 17. ARBURG. Ofitsiyni vebsait. URL: <https://www.arburg.com/en/> (data zvernennia: 10.07.2025).
 18. Pavlenko P. M. Tsyfrovii dviinyky adytyvnykh tekhnolohii v metaloobrobnykh haluziakh promyslovosti. U: *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system – 2024: materialy naukovo-praktychnoi konferentsii* (m. Chernihiv, 2024). Chernihiv: NU «Chernihivska politekhnika», 2024. S. 139–141.
 19. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.

Zenkin M.A., Remezovskyi O.M., Kokhanovskyi V.O. Application of additive technologies to restore and strengthen relevant parts of printing equipment

The article is devoted to the study of the potential application of additive technologies for the restoration and reinforcement of critical components of printing equipment. The authors analyze the effectiveness of 3D printing methods in ensuring technical reliability and accelerating repair processes. The relevance of the research is driven by the growing demand for flexible, rapid, and cost-effective solutions for restoring worn-out or unavailable parts in the printing industry. Under conditions of intensive machine operation and the absence of necessary spare parts in stock, the implementation of additive manufacturing helps minimize downtime, avoid prolonged production cycles associated with traditional casting or machining, and enhance the overall resilience of production processes. The aim of the research is to justify the effectiveness of additive manufacturing technologies for producing replacement parts for printing machines with high requirements for geometric accuracy, mechanical strength, and wear resistance, as well as to develop practical recommendations for their application. The study employed an experimental methodology that involved the fabrication of test samples from composite polymers and polyamide powder using FDM and SLS technologies. Mechanical tests for bending strength, wear resistance, and vibration durability were conducted, along with a metrological analysis of dimensional accuracy. As a result, it was established that FDM printing using composite materials allows for weight reduction of parts by up to 20% while maintaining strength comparable to traditional metal counterparts. SLS technology provides high precision (up to ±0.05 mm) and dimensional stability for components of complex

geometry. The study also demonstrated that the use of advanced technologies such as Arburg Plastic Freeforming (AKF) expands the possibilities of using standard industrial granulates in 3D printing, significantly reducing material costs. Prospects for further research include improving quality standards for additive manufacturing of printing components, developing new heat-resistant composites, and implementing digital libraries of part models in the maintenance systems of printing equipment.

Keywords: *additive technologies, 3D printing, printing equipment, part restoration, strengthening of assemblies, polymeric materials.*

Зенкін Микола Анатолійович – д.т.н., професор, професор кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), nikolay_zenkin@ukr.net

Ремезовський Олег Михайлович – аспірант кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), remez2024@outlook.com

Кохановський Василь Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ), v.kokhanovskyi@kpi.ua

Стаття подана 15.07.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-40-45>

УДК 621.311.24

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ ТГ-750 ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Стрункін Г.М.

EFFICIENCY OF WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION TG-750 ACCORDING TO THE RESULTS OF EXPERIMENTAL OPERATION

Strunkin H.M.

У статті вказано про необхідність покращення ефективності перетворення енергії вітру в електричну енергію. Наводяться відомості про те, що механічний мультиплікатор займає друге місце по фактору ненадійності серед обладнання вітроенергетичної установки. Через необхідність регламентних робіт, заміну мастила, погані екологічні та шумові характеристики розробники шукають альтернативні варіанти. Вказано, що тихохідні генератори, не зважаючи на великий досвід експлуатації, мають погані масогабаритні показники. Альтернативним та перспективним рішенням є застосування аеродинамічного мультиплікування. Порівняння вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням з установками на базі тихохідного генератора дозволяє зробити висновок про їх кращі масогабаритні показники. Наведено історичні відомості про розробку та вивчення вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. Описано принцип дії вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням та дано пояснення, як при цьому відбувається узгодження швидкості генератора. Наведено історичні помилки при оцінюванні ефективності аеродинамічного мультиплікування, виходячи з критерію Бетца. Показано, що Голубенко М.С. та його послідовники довели, що ефективність аеродинамічного мультиплікування не залежить від первинної вітротурбіни, а визначається лише параметрами вторинної вітротурбіни. Ккд при цьому розраховується як відношення коефіцієнту потужності вторинної вітротурбіни до її коефіцієнту гальмування. Приведено теоретичне значення ккд установки ТГ-750, яку Голубенко М.С. отримав на етапі проектування. За отриманими в

процесі дослідної експлуатації вітроенергетичної установки ТГ-750 даними побудовано графіки залежностей коефіцієнта потужності первинної та вторинної вітротурбіни та їх коефіцієнта гальмування. Розраховано залежність ефективності аеродинамічного мультиплікування від швидкохідності та виконано порівняння отриманих результатів з теоретичними значеннями. Реальний ккд виявився дещо нижчим від теоретичного, що пояснюється наявністю в установці, крім аеродинамічних процесів, суто механічних – тертя, вібрації тощо. Ефективність перетворення вітрової енергії в електричну в установках з аеродинамічним мультиплікуванням виявляється вищою, ніж у класичних вітротурбінах. Зроблено висновки про підтвердження теоретичних результатів результатами, отриманими в процесі дослідної експлуатації ТГ-750 та перспективність вивчення та впровадження установок подібного типу.

Ключові слова: вітроенергетична установка, аеродинамічне мультиплікування, ккд, коефіцієнт потужності, коефіцієнт гальмування.

Вступ. Вітроенергетики шукають способи підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну. Відомо, що мультиплікатор займає друге місце після лопатей за показниками ненадійності. За статистикою [1], 24% відмов серед парку німецьких вітроенергетичних установок (ВЕУ) припадала саме на несправності мультиплікатора. Якщо додати до цього необхідність періодичних регламентних робіт,

заміну мастила кожного року, погіршення екологічних характеристик через його витік, неабияке шумове випромінювання, то намагання відмовитися від механічного мультиплікування є оправданим [2].

Відмова від мультиплікатора можлива або при використанні тихохідних генераторів, що пов'язано з суттєвим збільшенням масогабаритних показників ВЕУ [3], або за допомогою заміни механічного мультиплікування аеродинамічним (АДМ) [4]. Тихохідні генератори використовуються досить давно. Їх експлуатація накопичила великий досвід. Але, як показано в [5], маса генератора потужністю 750 кВт для роботи безпосередньо з вітроколесом становить 15 тон, в той час, як маса традиційного синхронного генератора складає 5,2 тони, що разом з вагою мультиплікатора 8 тон сумарно дає деякий вигравш (13,2 проти 15). ВЕУ з АДМ ТГ-750, яку було введено у дослідну експлуатацію фірмою «Конкорд» на полігоні у м. Дніпро мала масу синхронних генераторів 10,65 тон. Подальше зниження маси генераторів можливо шляхом застосування асинхронних генераторів. Розрахунки, проведені в [6], оцінюють масу електрообладнання перспективної ВЕУ в 6,2 тони, тобто намітилася подальша перспектива по зниженню маси електрообладнання ВЕУ з АДМ.

На території України вперше в історії було як запропоновано, так і реалізовано інноваційний тип вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням.

Використовуючи теоретичні розробки А.Г. Уфимцева, Н.В. Красовський [7, 8] створив першу в світі установку з АДМ. Вона використовувала маленькі вітротурбіни, розташовані на лопатях великої турбіни, для узгодження обертання вітротурбіни з генератором. На жаль, тогочасний рівень технологій не дозволяв виготовляти достатньо міцні лопаті, тому ідея надовго забулася. Окрім кількох патентів у Німеччині та США, технологія АДМ не знайшла широкого застосування.

Проте, у 2002 році команда М.С. Голубенка з фірми «Конкорд» (Дніпро) запатентувала, спроектувала та побудувала дослідний зразок ВЕУ з АДМ ТГ-750 потужністю 750 кВт [9].

Відтоді розпочалися теоретичні дослідження вітроенергетичних установок цього типу. Сьогодні більшість досліджень все ще проводяться в Україні: М.С. Голубенко розробив більш потужні установки [10]; В.Ф.

Миргород [11] та Д.Г. Алексієвський [12] започаткували та розвинули створення математичних моделей ВЕУ з АДМ; П.Д. Андрієнко [13] запропонував новий підхід до керування потужністю таких установок за допомогою перетворювачів частоти; а автор (посилаючись на попередні публікації) досліджує поведінку ВЕУ з АДМ в автономних режимах [14-16]. З інших країн варто відзначити роботи команди Morgan L. (Глазго, Велика Британія) щодо застосування аеродинамічного мультиплікування в офшорній енергетиці [17, 18].

Дискусійне питання ефективності методів АДМ теоретично вирішив Голубенко М.С. [19]. Практичного підтвердження його розрахунків досьогодення опубліковано не було: на жаль, Голубенко М.С. пішов у засвіти, не встигнувши опрацювати накопичений емпіричний матеріал.

Метою роботи є аналіз ефективності перетворення вітрової енергії в електричну в вітроенергетичній установці ТГ-750 та перевірка отриманих раніше теоретичних засад.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вітротурбіна з аеродинамічним мультиплікуванням складається з великого вітрового ротора 1 (первинна вітротурбіна). На його лопатях розташовані гондоли 2, в яких знаходяться генератори (див. рис. 1). До осей генераторів прикріплені невеликі, але швидкісні вторинні вітротурбіни 3.

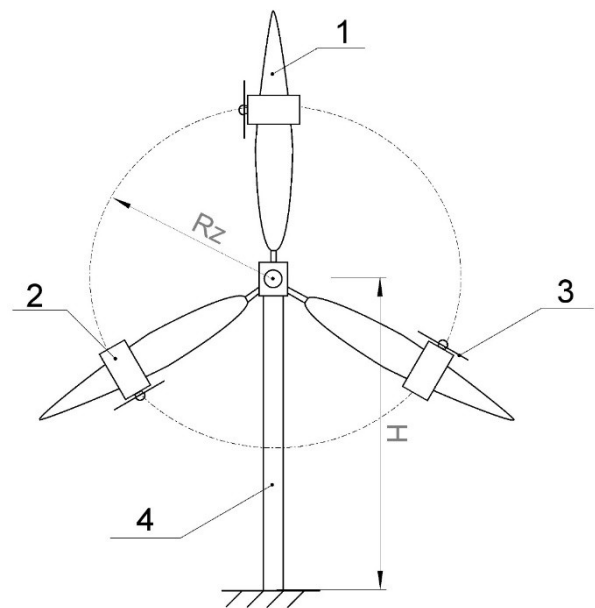


Рис. 1. Схема вітротурбіни з АДМ

Основна вітротурбіна не має власного генератора, а її вісь закріплена на опорі 4. Коли вітер (первинний вітровий потік) впливає на первинну турбіну, вона починає обертатися. Це обертання створює для гондоли з вторинною вітротурбіною вторинний вітровий потік. Швидкість цього вторинного потоку залежить від радіуса (Rz), на якому гондола закріплена на лопаті основної турбіни.

Наприклад, якщо основна вітротурбіна обертається зі швидкістю 16 обертів на хвилину (1,68 рад/с), а радіус Rz становить 13 метрів, то вторинний вітровий потік буде $1,68 \text{ рад/с} \times 13 \text{ м} = 21 \text{ м/с}$. Завдяки цьому вторинна вітротурбіна може бути невеликою, але при цьому обертатися дуже швидко – 400-600 обертів на хвилину або більше. Така швидкість обертання дозволяє відмовитися від використання механічного мультиплікатора (редуктора).

Отже, хоча вітротурбіна з АДМ складніша за звичайну, вона дозволяє збільшити обerti генераторів без механічного мультиплікатора. Цей метод збільшення швидкості обертання й називається аеродинамічним мультиплікуванням [4].

На етапі проектування ТГ-750 Голубенко М.С. теоретично обґрунтував [19], що загальна ефективність вітроенергетичної установки з АДМ становить не добуток коефіцієнтів потужності первинної та вторинної вітротурбін, як вважалося раніше (тобто не $0,593 \times 0,593 = 0,35$, відповідно до теоретичного значення критерію Бетца, чи $0,48 \times 0,48 = 0,23$ – відповідно до експериментального обмеження критерію Бетца), а відношення коефіцієнту потужності вторинної вітротурбіни C_{p2} до коефіцієнту її гальмування C_{t2} .

$$\eta = \frac{C_{p2}}{C_{t2}}. \quad (1)$$

Пізніше ці результати отримав і Morgan L. [17]. Аналізуючи (1), можна помітити, що ккд ВЕУ з АДМ залежить лише від параметрів вторинної вітротурбіни, та може бути суттєво вище за межу, яку встановлює критерій Бетца для традиційних вітротурбін [20, 21].

Голубенко М.С. для ТГ-750 на етапі проектування отримав максимальне теоретичне значення ккд ВЕУ $\eta = 0,82$ при швидкохідності вторинної вітротурбіни $Z_2 \approx 4$ [19].

Вимірювання C_{p2} та C_{t2} в процесі дослідної експлуатації приведено на графіку (Рис. 2).

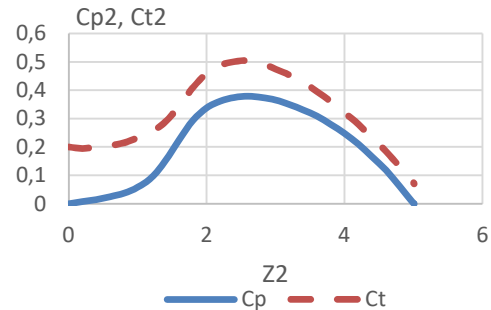


Рис. 2. Графік залежності C_{p2} та C_{t2} від швидкохідності вторинної вітротурбіни

За формулою (1) можна розрахувати та побудувати графік залежності ккд ТГ-750 від швидкохідності вторинної вітротурбіни (Рис. 3).

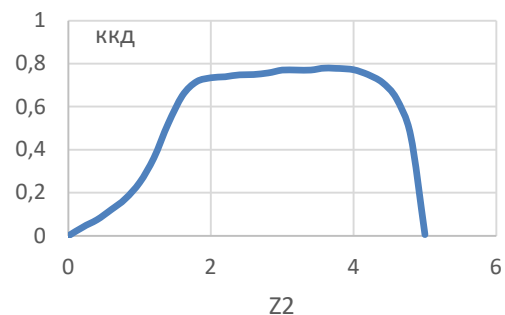


Рис. 3. Графік залежності ккд ТГ-750 від швидкохідності вторинної вітротурбіни

Значення реального ккд трохи нижче за теоретичний і при $Z_2 \approx 4$ сягає 0,78, що вище, ніж значення для класичних ВЕУ. Відмінність реального значення від значення, отриманого теоретично (0,78 замість 0,82) пояснюється впливом на ккд інших, неаеродинамічних, факторів – тертям вісі генератора, вібраціями, втрати на звукове випромінювання тощо.

Також було отримано характеристики C_{p1} та C_{t1} первинної вітротурбіни, які наведено на Рис. 4.

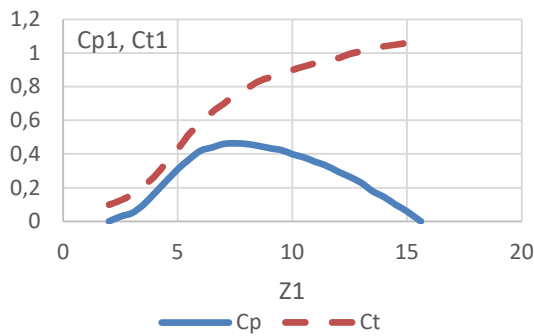


Рис. 4. Графік залежності C_{p1} та C_{t1} від швидкості вторинної вітротурбіни

Як можна бачити, первинна вітротурбіна має максимальне значення коефіцієнта потужності близько теоретичного значення критерія Бетца для реальних вітротурбін – 0,44.

Висновки. Розрахунки ефективності вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням ТГ-750 за результатами дослідної експлуатації дозволили отримати значення 0,78, що є близьким до теоретичного значення 0,82. Відмінність результатів пояснюється впливом механічних факторів. В цілому, можна вважати теоретичне твердження про визначеність ккд ВЕУ з АДМ параметрами лише вторинної вітротурбіни підтвердженням експериментально. Високе значення ефективності ВЕУ з АДМ відносно ВЕУ класичної схеми дозволяє висловити тезу про перспективність подальшого вивчення

Література

- Zheng R, Song Y, Fang H. Reliability analysis of wind turbines considering seasonal weather effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2024;239(2):289-297. DOI:https://doi.org/10.1177/1748006X241235727
- Ranjan R, Kumar S, Ghosh SK, Kumar M. Experimental and statistical analysis of wear on gear material. *Lubrication Science*. 2023;1-11. DOI:https://doi.org/10.1002/lc.1650.
- W. Wu, V. S. Ramsden, T. Crawford and G. Hill, "A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines," *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, Rome, Italy, 2000, pp. 147-154 vol.1, DOI:https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881049.
- Голубенко Н.С. Ветроустановка турбогенераторная установка ТГ-750 / Н.С. Голубенко, В.Е. Олишевская, С.Д. Курдюков, Г.С. Олишевский, С.С. Курдюков // *Наука та інновації*. 2008. 4, №6: 71-77. DOI:https://doi.org/10.15407/scin4.06.071.
- Son, Yoon-Gyu, and all. Test results of an inverter system for 750kW gearless wind turbine. *Proceedings of the Korean Society for New and Renewable Energy Conference, 2005, Spring Conference of the Korean Society for New and Renewable Energy 2005.6 p.59-63*.
- Стрункін Г.М. Оцінювання маси основного обладнання вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025. №2. С.49-55. DOI:https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-49-55.
- Ветроэлектрический генератор: Пат. 1457, Класс 88-с. СССР; заявл. 14.01.1924; опубл. 31.07.1926.
- Красовский Н.В. Схема ветряного двигателя с аэродинамической передачей для мощностей 100-3.000 кв / Н.В. Красовский // *Известия ОГИН. Москва. Ан СССР*. 1939. №5: 15.
- Вітродвигун: Патент 49970 Україна, МПК F03D 1/00; заявл. 30.03.2002; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
- Голубенко Н.С. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / Голубенко Н.С., Довгалюк С.М., Фельдман А.М., Цыганов В.А. // *Нетрадиционная энергетика XXI века: Материалы IV международной конференции (Крым, Гурзуф, 2003)*. 2003: 68-74.
- Миргород В.Ф., Ранченко Г.С., Голубенко Н.С. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2006. № 4(30). С. 96–99.
- Alekseevskiy, Dmitriy, et al. "Procedure for the Synthesis of Models of Electrotechnical Complexes." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 9, 2018: 48-54, DOI:https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150483.
- Андриенко П.Д. Повышение единичной мощности и эффективности ВЭУ с аэродинамической мультипликацией/П. Д. Андриенко, В. П. Метельская, И. Ю. Немудрый // *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: проблемы автоматизированного электропривода*. Харьков: НТУ "ХПИ". 2013. № 36 (1009): С. 394-395.
- Strunkin, H. (2024). Simulation of the operation of a voltage inverter as part of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor. *Technologies and Engineering*, 25(6): 69-79. DOI:https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.6.7.

15. Strunkin H., "Simulation of the operation of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter," *Turk J Electr Power Energy Syst.*, 2025; 5(2), 142-151. DOI:<https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24034>.
16. Strunkin G. Wind turbines with aerodynamic multiplication. Retrospective review. // *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, 2.2025, p. 9-12.
17. Morgan, L. and Leithead, W.: Aerodynamic modelling of a novel vertical axis wind turbine concept, *Journal of Physics: Conference Series*, 2257. DOI:<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2257/1/012001>, 2022.
18. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. (2024). On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. *Wind Energy*, 27(6): 569-582. DOI:<https://doi.org/10.1002/we.2901>.
19. Голубенко Н.С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности // *Нетрадиционная энергетика XXI века: материалы IV междунар. конф., Крым, Гурзуф*. 2003. С. 125–132.
20. Anderson, C. (2020). *Wind Turbines: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
21. Стрункін Г.М. Застосування пристроїв силової електроніки. Дніпро. Середняк Т. К., 2024: 408. ISBN 978-617-8139-59-9. DOI:<https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.
5. Son, Yoon-Gyu, and all. Test results of an inverter system for 750kW gearless wind turbine. *Proceedings of the Korean Society for New and Renewable Energy Conference, 2005, Spring Conference of the Korean Society for New and Renewable Energy 2005.6* p.59-63.
6. Strunkin H.M. Ocinyuvannya masi osnovnogo obladnannya vitroenergetichnoyi ustanovki z aerodinamichnim multiplikuvannyam na bazi asinhronnogo generatora z faznim rotorom. // *Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya*. 2025 №2. p.49-55. DOI:<https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-49-55>.
7. Ветроэлектрический генератор: Пат. 1457, Класс 88-s. SSSR; заявл. 14.01.1924; опubl. 31.07.1926.
8. Красовский Н.В. Shema vetryanogo dvigatelya s aerodinamicheskoy peredachej dlya moshnostej 100-3.000 kv / N.V. Krasovskij // *Izvestiya OGIN*. Moskva. An SSSR. 1939. №5: 15.
9. Vitrodvigun: Patent 49970 Ukrayina, MPK F03D 1/00; заявл. 30.03.2002; opubl. 15.10.2002, Byul. № 10.
10. Golubenko N.S. Tendencii razvitiya vetroenergetiki i bezmultiplikatornye vetrovye ustanovki / Golubenko N.S., Dovgalyuk S.M., Feldman A.M., Cyganov V.A. // *Netradicionnaya energetika XXI veka: Materialy IV mezhdunarodnoj konferencii (Krym, Gurzuf, 2003)*. 2003: 68-74.
11. Mirgorod V.F., Ranchenko G.S., Golubenko N.S. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov vitroenergeticheskoy ustanovki bolshoj mo-shnosti. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnolo-giya*. 2006. № 4(30). S. 96–99..
12. Alekseevskiy, Dmitriy, *et al.* "Procedure for the Synthesis of Models of Electrotechnical Complexes." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 9, 2018: 48-54, DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150483>.
13. Andrienko P.D. Povyshenie edinichnoj mo-shnosti i effektivnosti VEU s aerodinami-cheskoj multiplikacij/P. D. Andrienko, V. P. Metelskaya, I. Yu. Nemudryj // *Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: problemy avtomatizirovannogo elekt-roprivoda*. Harkov: NTU "HPI". 2013. № 36 (1009): S. 394-395.
14. Strunkin, H. (2024). Simulation of the operation of a voltage inverter as part of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor. *Technologies and Engineering*, 25(6): 69-79. DOI:<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.6.7>.

References

1. Zheng R, Song Y, Fang H. Reliability analysis of wind turbines considering seasonal weather effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2024;239(2):289-297. DOI:<https://doi.org/10.1177/1748006X241235727>
2. Ranjan R, Kumar S, Ghosh SK, Kumar M. Experimental and statistical analysis of wear on gear material. *Lubrication Science*. 2023;1-11. DOI:<https://doi.org/10.1002/ls.1650>.
3. W. Wu, V. S. Ramsden, T. Crawford and G. Hill, "A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines," *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, Rome, Italy, 2000, pp. 147-154 vol.1, DOI:<https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881049>.
4. Golubenko N.S. Vetrovaya elektricheskaya turbogenera-tornaya ustanovka TG-750 / N.S. Golubenko, V E. Olishevskaya, S.D. Kurdyukov, G.S. Olishevskij, S.S. Kurdyukov // *Nauka ta innovaciyi*. 2008. 4, №6: 71-77. DOI:<https://doi.org/10.15407/scin4.06.071>.

- Published online January 27, 2025.
DOI: <https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24034>.
16. Strunkin G. Wind turbines with aerodynamic multiplication. Retrospective review. // *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, 2.2025, p. 9-12.
 17. Morgan, L. and Leithead, W.: Aerodynamic modelling of a novel vertical axis wind turbine concept, *Journal of Physics: Conference Series*, 2257. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2257/1/012001>, 2022.
 18. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. (2024). On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. *Wind Energy*, 27(6): 569-582. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.2901>.
 19. Golubenko N.S. Aerodinamicheskie osobennosti bezmultiplikatornoj turbogeneratornoj shemy vetroelektricheskoy ustanovki bolshoj moshnosti // *Netradicionnaya energetika XXI veka: materialy IV mezhdunar. konf., Krym, Gurzuf. 2003.* – p. 125–132.
 20. Anderson, C. (2020). *Wind Turbines: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
 21. Strunkin G.M. *Zastosuvannya pristrojiv silovoyi elektroniki*. Dnipro. Serednyak T. K., 2024: 408. ISBN 978-617-8139-59-9. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.

Strunkin H.M. Efficiency of wind power plant with aerodynamic multiplication tg-750 according to the results of experimental operation

The article indicates the need to improve the efficiency of converting wind energy into electrical energy. Information is provided that the mechanical multiplier ranks second in terms of unreliability among the equipment of a wind power plant. Due to the need for routine maintenance, oil replacement, poor environmental and noise characteristics, developers are looking for alternative options. It is indicated that low-speed generators, despite extensive operating experience, have poor weight-and-dimensions. An alternative and promising solution is the use of aerodynamic multiplication. A comparison of wind power plants with aerodynamic multiplication with plants based on a low-speed generator allows us to conclude that they have better weight-and-dimensions.

Historical information is provided on the development and study of wind power plants with aerodynamic multiplication. The principle of operation of wind power plants with aerodynamic multiplication is described and an explanation is given of how the generator speed is matched. Historical errors in assessing the efficiency of aerodynamic multiplication based on the Betz criterion are presented. It is shown that Golubenko M.S. and his followers proved that the efficiency of aerodynamic multiplication does not depend on the primary wind turbine, but is determined only by the parameters of the secondary wind turbine. The efficiency is calculated as the ratio of the power coefficient of the secondary wind turbine to its braking coefficient. The theoretical value of the efficiency of the TG-750 plant, which Golubenko M.S. obtained at the design stage, is given. According to the data obtained during the experimental operation of the TG-750 wind power plant, graphs of the dependences of the power coefficient of the primary and secondary wind turbines and their braking coefficients are constructed. The dependence of the efficiency of aerodynamic multiplication on speed was calculated and the results obtained were compared with theoretical values. The real efficiency turned out to be somewhat lower than the theoretical one, which is explained by the presence in the installation, in addition to aerodynamic processes, of purely mechanical ones - friction, vibration, etc. The efficiency of converting wind energy into electricity in installations with aerodynamic multiplication is higher than in classical wind turbines. Conclusions were drawn about the confirmation of the theoretical results by the results obtained in the process of experimental operation of the TG-750 and the prospects for studying and implementing installations of this type.

Key words: wind power plant, aerodynamic multiplication, efficiency, power factor, braking factor.

Стрункін Гліб Миколайович – магістр, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка», Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. 69006, Запоріжжя, проспект Соборний, 226, e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Стаття подана 09.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-46-55>

УДК 622.7: 534

ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

**Моркун Н.В., Азарян А.А., Грищенко С.М.,
Рубан С.А., Грищенко А.М., Гапоненко А.А.**

FORMATION OF AN INFORMATION BASE FOR AUTOMATED CONTROL OF THE WELL DRILLING PROCESS

**Morkun N.V., Azaryan A.A., Hryshchenko S., M.,
Ruban S. A., Gritsenko A. M., Gaponenko A.A.**

Запропоновано метод інформаційного забезпечення автоматизованого керування процесом буріння свердловин у залізовмісних породах на основі електромагнітного вихрострумове перетворення зондуючих сигналів. При моделюванні залежностей параметрів вихрострумове датчика від характеристик досліджуваного середовища використана його трансформаторна модель у вигляді двох котушок з повітряними сердечниками, розташованими одна над одною на певній відстані. Трансформаторна модель вихрострумове датчика адекватно відображає процеси, що у ньому відбуваються при зміні електропровідності та магнітної проникності досліджуваного зразка. Первинний контур трансформаторної моделі представляє вимірювальну котушку датчика. Досліджуване середовище утворює вторинний контур трансформаторної моделі. Імпеданс вимірювальної котушки залежить від фізико-хімічних та текстурно-структурних властивостей досліджуваного середовища, а також від робочої частоти джерела струму датчика. Дійсна частина імпедансу визначається опором контуру, у якому протікають вихрові струми. Імпеданс датчика та спектральна характеристика вимірюваного сигналу доцільно застосовувати для оцінки характеристик досліджуваного середовища. Для апробації підходу використана експериментальна платформа та комбінований електромагнітний перетворювач. Комбінований зонд розміщується над середовищем, у якому одночасно збуджуються та приймаються ультразвуковий сигнал та сигнал вихрових струмів. Моделювання параметрів комбінованого датчика дозволило визначити і формалізувати зв'язок параметрів вимірювальної котушки датчика з характеристиками досліджуваного середовища.

Виконаний аналіз показав, що використання параметрів вихрострумове перетворення у наборі з ультразвуковими вимірюваннями покращує результати розпізнавання основних мінералогічно-технологічних різновидів залізовмісних руд експлуатованого родовища. Одержані результати дозволяють підвищити ефективність автоматизованого керування процесом буріння свердловин у процесі видобутку залізовмісних руд із застосуванням інформації про фізико-механічні характеристики та геологічну структуру породи, що буриться.

Ключові слова: буріння, свердловина, керування, автоматизація, характеристики, електромагнітний перетворювач.

Вступ. Оптимізація параметрів буріння є вирішальною методологією для підвищення швидкості проходки (ROP) і служить важливою стратегією для досягнення зниження витрат та підвищення ефективності в буровій техніці. Оптимізація параметрів буріння може проводитися на основі моделі динаміки бурильної колони та моделі ROP. Тим не менш, залишається помітна прогалина в дослідженнях оптимізації параметрів буріння з використанням багатоелементних методів, що розглядають обидві моделі одночасно. Перспективним підходом є створення комплексної повномасштабної моделі динаміки бурильної колони поряд з моделлю прогнозування та оптимізації ROP на основі штучних нейронних мереж (ANN). Враховуючи ефективність

передачі енергії, інтенсивність вібрації та різні фактори, що впливають на ROP під час процесу буріння, доцільним є використання багатоелементних методів [1]. Але застосування такого підходу потребує відповідного інформаційного забезпечення.

Вимірювання під час буріння є основним засобом отримання параметрів свердловинного інженерного забезпечення в режимі реального часу. Сучасні одноточкові, двоточкові та багатоточкові інтелектуальні вимірювальні системи бурильної колони можуть забезпечити раннє виявлення газових скорочень, витоків та інших умов [2]. Однак ці методи мають недоліки, такі як висока вартість використання та обмежені можливості стосовно визначення характеристик залізородних порід.

Неруйнівний контроль металовмісних матеріалів, є зростаючою сферою, яка потребує нових сенсорних рішень. Датчики вихрових струмів – це пристрої, здатні безконтактно оцінювати з високою роздільною здатністю будь-яку електропровідну мішень. Висока роздільна здатність і толерантність до забрудненого середовища роблять датчики вихрових струмів незамінними в сучасних промислових операціях. Одним із застосувань датчиків вихрових струмів є вимірювання електропровідності.

Величина електропровідності матеріалу залежить від його хімічного складу і кристалічної будови [3].

У роботі [4] розглянуто теоретичні основи конструювання датчиків вихрових струмів. Такі датчики вимірюють провідність матеріалів шляхом індукції вихрових струмів і спостереження за впливом на вимірювальну котушку датчика, що дозволяє спростити його конструкцію та обіцяє економічну перевагу при реалізації. Опис відповідної моделі реалізовано за допомогою еквівалентної схеми RLC. Розроблена модель перевірена шляхом порівняння з експериментальними спостереженнями. Результат сприяє кращому розумінню фізичних ефектів та параметрів вихрострумового перетворення для використання у майбутніх розробках конструкції датчиків.

У якості вимірюваного параметру при реалізації методу вихрострумового контролю може використовуватися імпеданс котушки датчика, який пов'язаний з електропровідністю та магнітною проникністю зразків [5]. Завдяки наявності залежності між цими змінними, випробування на основі ефекту вихрострумового перетворення дозволяють

виявити пошкодження матеріалів та контролювати стан технологічного процесу [6]. У роботі [7] наведено результати дослідження з випробування твердості для оцінки знеуглецювання сталі. Методи вихрових струмів також використовують варіацію відриву для вимірювання товщини покриття непровідних матеріалів або товщини оксиду провідних матеріалів [8].

Для вивчення впливу геометричної структури вимірювальної котушки на електромагнітні характеристики зонда в процесі вихрострумового контролю у роботі [9] досліджені різні моделі зондової котушки. Ці моделі геометричної структури включають різницю між внутрішнім і зовнішнім радіусами, товщиною та еквівалентним радіусом. Розподіл магнітного поля навколо зонда моделюється та аналізується за різними параметрами, а ефективність вимірювань оцінюється в поєднанні зі швидкістю зміни магнітного поля навколо котушки зонда. Результати моделювання показують, що при ближчому розташуванні збільшення різниці між внутрішнім і зовнішнім радіусами, зменшення товщини та зменшення еквівалентного радіуса є корисними для покращення роздільної здатності вимірювань.

Вихроструміві датчики переміщення (ECDS) широко використовуються для безконтактного вимірювання положення малих переміщень (відривів). Проблеми виникають із більшими переміщеннями, оскільки чутливість ECDS зменшується. Це призводить до більш вираженого впливу змін температури на індуктивність і, як наслідок, збільшення похибки позиціонування. Конструкційні рішення часто покладаються на кілька котушок, відповідні матеріали для опор котушок і компенсаційні заходи для вирішення проблем. У дослідженні [10] представлено ECDS з однією котушкою для великих діапазонів переміщення в середовищах із високими температурами та коливаннями температури. Аналіз базується на моделі датчика, отриманій з моделі еквівалентної схеми (ECM). Ключовою частиною покращення характеристик датчика за змінних температур є температурна компенсація індуктивності чутливої котушки на основі моделі. Виконаний аналіз показує, що ця конструкція ECDS з однією котушкою зберігає похибку положення менше ніж 0,2% повної шкали для зміни температури 100 K для чутливої котушки та 110 K для мішені.

У роботі [11] представлено комплексний аналіз того, як розробити датчик вихрових струмів (ECS) з високою роздільною здатністю та низьким тепловим дрейфом. Для пояснення впливу цільової провідності та робочої частоти на чутливість і стабільність ECS досліджена еквівалентна модель на основі трансформатора. Взаємозв'язки між параметрами ECS і цільовими умовами отримані за допомогою аналізу кінцевих елементів (FEA). Отримані результати доводять, що датчик, працюючий на вищій частоті та з кращою провідністю, має покращені характеристики. Нова високопродуктивна схема синхронної демодуляції на основі моста була розроблена для точного окремого вимірювання крихітних коливань індуктивності та опору котушки датчика. Було виготовлено та випробувано прототип ECS. Результати показують, що загальний шум цього ECS від 0,1 Гц до 100 Гц становив лише 70 μrms (середньоквадратичне значення), а температурний дрейф менше 3 $\text{nm}/^\circ\text{C}$.

У роботі [12] наведено результати розробки та аналізу вихрострумowego датчика переміщення малого розміру. За результатами моделювання визначено оптимальну структуру обмотки та розміри датчика. Використано лінійний підхід для перетворення сигналу зміщення змінного струму датчика в сигнал постійного струму. Нарешті, запропоновано метод компенсації для пом'якшення температурного дрейфу датчика при різних робочих температурах. Результати експериментів показують, що запропонований датчик має чутливість приблизно 3 μm , робочий температурний діапазон 25–55 $^\circ\text{C}$ і лінійність $\pm 1,025\%$.

Таким чином, метод вихрострумowego контролю є перспективним щодо оперативного вимірювання характеристик рудних матеріалів але можливості та умови його використання при бурінні свердловин потребують додаткових досліджень.

Метою роботи є обґрунтування використання методу електромагнітного вихрострумowego перетворення та принципів побудови засобів визначення фізико-механічних хіміко-мінералогічних характеристик залізної руди на його основі для формування інформаційної бази автоматизованого керування процесом буріння свердловин.

Викладання основного матеріалу. Метод вихрострумowych вимірювань базується на

фундаментальних рівняннях Максвелла на основі яких можна отримати наступний вираз [13]

$$\nabla^2 H - (j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)H = 0, \quad (1)$$

де H - напруженість магнітного поля; σ - провідність; ε - діелектрична проникність; μ - магнітна проникність; ∇ - оператор дивергенції.

Рівняння (1) можна записати у приблизній формі

$$\nabla^2 H - j\omega\mu\sigma H = 0. \quad (2)$$

Тоді можна отримати

$$\nabla^2 E - j\omega\mu\sigma E = 0, \quad (3)$$

$$\nabla^2 J - j\omega\mu\sigma J = 0, \quad (4)$$

де E - напруженість електричного поля; J - густина струму.

Вирази (2)-(4) є теоретичною основою вихрострумовой технології. З рівняння (1) випливає, що формою руху електромагнітного поля є хвиля.

Концентрація індукованого вихрового струму поблизу поверхні досліджуваного провідного матеріалу пов'язана з явищем скін-ефекту. Трансформаторна модель вихрострумowego датчика добре відбиває процеси, що у ньому відбуваються, коли характеристики досліджуваного середовища змінюються [14-16]. Первинний контур трансформаторної моделі, імпеданс якої дорівнює відношенню $Z_c = \frac{U}{I}$, представляє котушку датчика (рис. 1) [15].

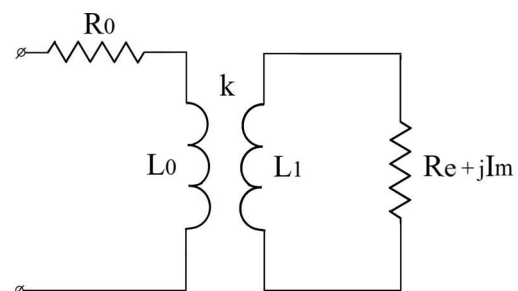


Рис. 1. Трансформаторна модель вихрострумowego датчика

Досліджуване середовище утворює вторинний контур трансформаторної моделі. Дійсна частина імпедансу Re визначається опором контуру, у якому протікають вихрові струми, тобто опір Re пропорційний питомому

опору досліджуваного середовища. Уявний член $j\text{Im}$ є індуктивністю розсіювання контуру. Нарешті, коефіцієнт зв'язку k визначається відстанню між датчиком та досліджуваним середовищем. Коефіцієнт k зменшується із збільшенням відстані.

При моделюванні залежностей параметрів вихрострумів датчика від характеристик досліджуваного середовища зручно використовувати його модель у вигляді двох котушок з повітряними сердечниками, розташованими одна над одною на відстані L_0 [17-19].

На датчик (повітряна котушка C_0) подається синусоїдальний струм $i(t) = I_0 \cos(\omega t)$. Досліджуваний матеріал змодельований у вигляді віртуальної котушки (котушка з повітряним сердечником C_p). Вихровий струм $i_{ind}(t)$ протікає у цій віртуальній котушці з повітряним сердечником C_p . Електричний потенціал на котушках C_0 і C_p визначається як

$$u(t) = R_0 i(t) + L_0 \partial_i i(t) + M \partial_i i_{ind}(t), \quad (5)$$

$$0 = R i_{ind}(t) + L \partial_i i_{ind}(t) + M \partial_i i(t), \quad (6)$$

де R_0, L_0, R, L та M - відповідно опір, власна індуктивність датчика (котушка C_0), опір, власна індуктивність віртуальної котушки C_0 , взаємна індуктивність між цими котушками.

З (5) і (6) можна отримати напругу U , прикладену до датчика, як

$$U = (R_0 + j\omega L_0) I_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R + j\omega L} I_0. \quad (7)$$

Імпеданс датчика Z визначається шляхом поділу напруги U на струм джерела I_0

$$Z = R_0 + \frac{R\omega^2 M^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + j \left[\omega L_0 - \frac{L\omega^3 M^2}{R^2 + \omega^2 L^2} \right]. \quad (8)$$

Значення R та L можна розглядати як еквівалентний опір та індуктивність досліджуваного матеріалу. Тоді поверхневий імпеданс Z_s визначається виразом

$$Z_s = R + j\omega L. \quad (9)$$

Імпеданс Z_s залежить від фізико-хімічних та текстурно-структурних властивостей досліджуваного середовища, а також від робочої частоти джерела струму датчика [19].

Рівняння імпедансу датчика (8) можна представити у такому вигляді

$$Z = R_0 + \frac{\text{Re}(Z_s)\omega^2 M^2}{\text{Re}^2(Z_s) + \text{Im}^2(Z_s)} + j \left[\omega L_0 - \frac{\text{Im}(Z_s)\omega^2 M^2}{\text{Re}^2(Z_s) + \text{Im}^2(Z_s)} \right]. \quad (10)$$

При використанні диференціального методу вимірювань вираз (10) дозволяє просто обчислити зміну імпедансу ΔZ , що визначається як різниця між імпедансом датчика, розміщеного над еталонним зразком з відомими характеристиками (Z_1), і імпедансом датчика щодо досліджуваного зразка (Z_2) [17,19]

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = \frac{\text{Re}(Z_{s1})\omega^2 M_1^2}{\text{Re}^2(Z_{s1}) + \text{Im}^2(Z_{s1})} - \frac{\text{Re}(Z_{s2})\omega^2 M_2^2}{\text{Re}^2(Z_{s2}) + \text{Im}^2(Z_{s2})} + j \left[\frac{\text{Im}(Z_{s2})\omega^2 M_2^2}{\text{Re}^2(Z_{s2}) + \text{Im}^2(Z_{s2})} - \frac{\text{Im}(Z_{s1})\omega^2 M_1^2}{\text{Re}^2(Z_{s1}) + \text{Im}^2(Z_{s1})} \right]. \quad (11)$$

Перевагою системи, що реалізує диференціальний метод вимірювань (рис. 2), є у тому, що вона забезпечує автоматичну температурну компенсацію [14].

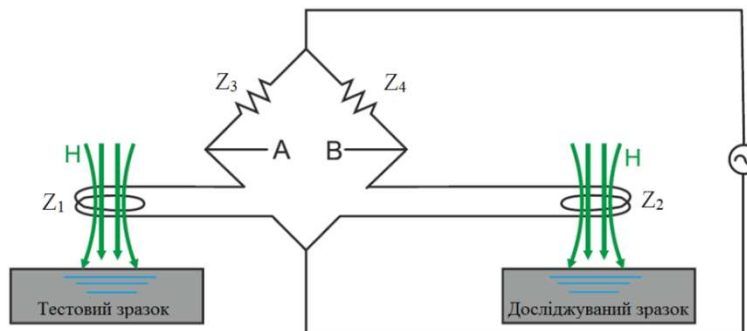


Рис. 2. Схема моделі, що реалізує диференціальний метод вихрострумів вимірювань

Функція збудження імпульсної напруги, що використовується в моделі, може бути виражена як [20]

$$u(t) = \left(1 - e^{-\frac{t-d}{a}}\right) \text{step}(t-d) + \left(e^{-\frac{t-\tau-d}{a}} - 1\right) \text{step}(t-\tau-d) \quad (0 \leq t \leq T), \quad (12)$$

де a - час наростання, d - час затримки, $\text{step}(t)$ - одинична крокова функція, τ - затримка ширини імпульсу, а T - період.

Щоб отримати частотні компоненти сигналу напруги, швидко перетворення Фур'є (FFT) використовується для перетворення сигналу напруги в часовій області у частотну область

$$\sum_{n=1}^N U(w_n) = \text{FFT}[u(t)], \quad (13)$$

де N - кількість точок вибірки FFT.

Коли котушка збуджується імпульсною напругою, дуже легко виявити зміну струму котушки. Поточну зміну частотної області можна розрахувати за допомогою рівняння [20]

$$\sum_{n=1}^N \Delta I(w_n) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{Z_{air}(w_n)} - \frac{1}{Z_c(w_n)} \right] U(w_n), \quad (14)$$

де $Z_{air}(w_n)$ - повний опір котушки в повітрі; $Z_c(w_n)$ - повний опір котушки в середовищі.

Слід зазначити, що опір і індуктивність котушки в повітрі постійні. Індуктивний опір пропорційний частоті збудження та індуктивності котушки $Z_{air}(w_n)$ можна легко виміряти в реальних експериментах.

Спрощена версія рівняння (14) має вигляд [20]

$$\sum_{n=1}^N \Delta I(w_n) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\Delta Z(w_n)}{Z_{air}(w_n)[Z_{air}(w_n) + \Delta Z(w_n)]} \right] U(w_n), \quad (15)$$

де $U(w_n)$ обчислюється за допомогою рівняння (13).

Сигнал відповіді РЕС у часовій області можна отримати шляхом застосування операції зворотного перетворення Фур'є (IFFT) до формули (15)

$$\Delta I(t) = \text{IFFT}[\sum_{n=1}^N \Delta I(w_n)]. \quad (16)$$

Для моделювання вихрострумowego датчика застосована платформа та програмні продукти Simscape Matlab/Simulink® [21-23]. На рис. 3 наведена схема моделі для дослідження характеристик вихрострумowego датчика.

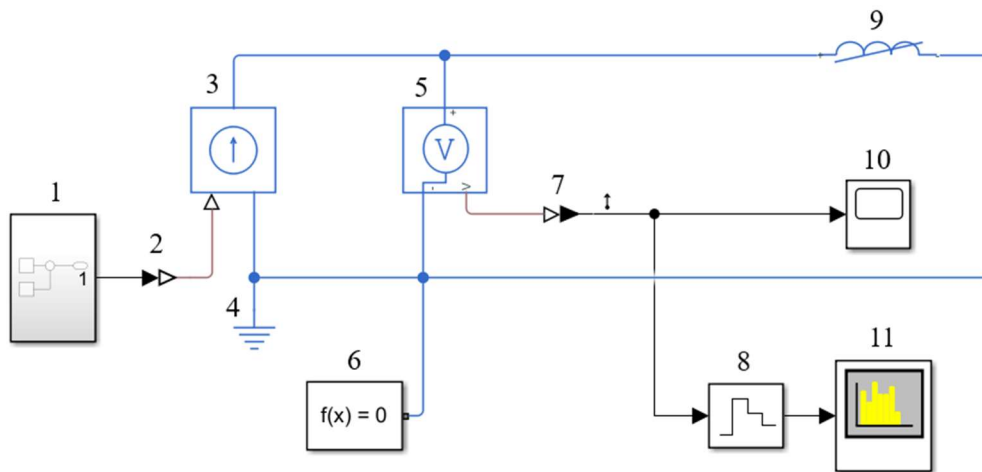


Рис. 3. Схема моделі для дослідження характеристик вихрострумowego датчика:

1 - блок формування параметрів електромагнітних імпульсів; 2 - блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 - блок Controlled Current Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 4 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 5 - блок Voltage Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 6 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 7 - блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 8 - блок Zero-Order Hold із бібліотеки Simulink / Discrete; 9 - блок Inductor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 10 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 11 - блок Spectrum Analyzer із бібліотеки DSP System Toolbox / Sinks

Блок 1 формування параметрів електромагнітних імпульсів у просторі Simulink генерує імпульси обраної амплітуди, частоти та форми, які за допомогою блока 2 Simulink-PS Converter та блока 3 Controlled Current Source перетворюють їх у фізичний сигнал у просторі Simscape. Блок 9 Inductor моделює лінійний індуктор, описаний таким рівнянням

$$U = L \frac{dI}{dt}, \quad (17)$$

де U – напруга; L – індуктивність; I – струм; t – час.

Параметри цього блока встановлюються безпосередньо у специфікації блока або програмується у робочому просторі Matlab. Результати моделювання відображаються блоком 5 Voltage Sensor, блоком 10 Scope та блоком 11 Spectrum Analyzer. Необхідне при цьому перетворення сигналів виконується блоком 7 PS-Simulink та блоком 8 Zero-Order Hold.

Наведена на рис. 3 схема дозволяє моделювати параметри вихрострумowego датчика як в часовій, так і в частотній області.

На рис. 4 наведено спектрограму сигналу на вимірювальній котушці вихрострумowego датчика.

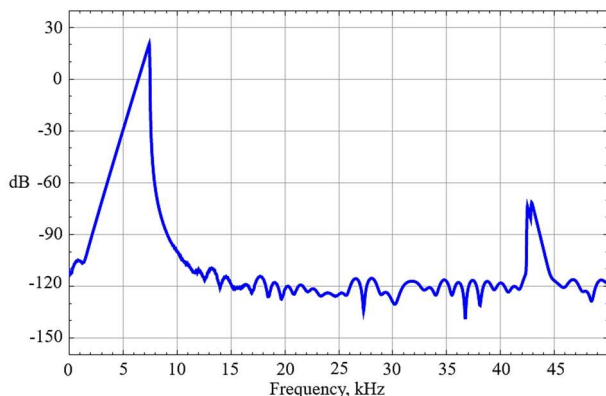


Рис. 4. Спектрограма сигналу на вимірювальній котушці вихрострумowego датчика

Для апробації наведеного вище підходу використано експериментальну платформу та комбінований електромагнітний перетворювач [24,25]. Комбінований зонд розміщується над середовищем, у якому одночасно збуджуються та приймаються ультразвуковий сигнал та сигнал вихрових струмів.

Комбінований перетворювач складається зі спіральної котушки та постійного магніту NdFeB. Котушка виготовлена на основі гнучкої

друкованої плати (FPC) і має діаметр 16 мм та 25 витків. Діаметр магніту 17,5 мм, висота 18 мм, залишковий магнетизм 1,15 Тл. Для збудження та обробки вимірюного сигналу, включаючи обмеження, багатоступінчасте посилення та смугову фільтрацію використана універсальна ультразвукова система з комп'ютерним керуванням RITEC RAM - 5000. Використана система забезпечує імпульсні ультразвукові вимірювання та резонансну спектроскопію. Фазочутливий супергетеродинний приймач здатен виділяти сигнали із шуму, характеризувати досліджувані матеріали шляхом вимірювання затухання, швидкості розповсюдження або резонансних частот, що охоплює діапазон від 50 кГц до 40 МГц. Стробований підсилювач забезпечує високу потужність радіочастотних пакетних імпульсів до 5 кВт, RMS до 7 МГц. Доступна багатоканальна система генератор/приймач із незалежним керуванням шириною пакету, частотою, затримкою та фазою для кожного вихідного сигналу.

Запропонований підхід використаний для модернізації методу визначення мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища [26]. За цим методом у якості інтегративного параметру S , який визначається дисперсією та середніми значеннями інтенсивності прийнятого формаційної бази для ідентифікації мінералогічних різновидів залізної руди застосовуються результати вимірювання швидкості та затухання поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль відповідної частоти, на основі яких обчислюється акустичні добротності зразка гірської породи, та характер ультразвукового сигналу, який пройшов певну відстань у досліджуваному середовищі. Нечітка класифікація цих параметрів, що ґрунтується на аналізі їх властивостей у векторному просторі ознак, дозволяє шляхом мінімізації суми зважених відстаней між аналізованими та зразковими значеннями результатів вимірювань віднести досліджуваний зразок з певним ступенем належності до основних технологічних типів руд експлуатованого родовища. Виконаний аналіз показав, що додавання до зазначеного набору інформативних ознак такого параметра, як імпеданс вихрострумowego датчика, дозволяє на 8-10% покращити результати розпізнавання різновидів руди в умовах зміни її текстурно-структурних особливостей.

Висновки. Аналіз стану досліджень виявив значну кількість наукових праць, присвячених дослідженню закономірностей, математичному й імітаційному моделюванню процесів буріння свердловин при видобутку залізорудної сировини із застосування різних методів оперативного контролю параметрів процесів. Водночас, варто відзначити, що застосування згаданих методів і засобів потребує відповідного математичного апарату, який би дозволив здійснити формалізацію зв'язків між параметрами процесу буріння та характеристиками мінералого-технологічних різновидів залізорудної сировини, що утворюють гірську породу.

Досліджений метод електромагнітного вихрострумовеого контролю має низку переваг перед існуючими підходами, що застосовуються для оцінки характеристик гірської породи під час буріння свердловин, і може бути ефективно застосований для покращення якості інформаційного забезпечення та оптимізації цього процесу.

Напрямок подальших досліджень слід вважати визначення експлуатаційних можливостей запропонованого методу вимірювання характеристик залізозмісних руд в процесі буріння свердловин із врахуванням існуючих збурюючих факторів та перешкод у реальних виробничих умовах.

Література

- Hai W., He Y., Li Y., Shan Y., Wang C., Xue Q. Multi-element drilling parameter optimization based on drillstring dynamics and ROP model. *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol. 244. P. 213460. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213460>.
- Li M., Wang H., Liao M., Yang Y. Field Measurement and Retrieval Research of Multiphysics Micro-measurement Devices During the Drilling Process in Oil and Gas Wells. In: Zhou, K. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering*. ICCES 2024. Mechanisms and Machine Science. 2024. Vol. 168. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68775-4_65.
- Rodrigues N., Luis S. Rosado. Development of a miniaturized electrical conductivity gauge based on eddy currents testing. 2016. DOI:10.13140/RG.2.2.23860.17289.
- Harms J., & Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021. Vol.6, No 1. P. 37. <https://doi.org/10.3390/I3S2021Dresden-10103>.
- Zergoug M., Lebaili S., Boudjellal H., Benchaala A. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. *NDT & E International*. 2004. Vol. 37, P. 65–72. DOI:10.1016/j.ndteint.2003.09.002
- García-Martín J., Gómez-Gil J., & Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*. 2011. Vol.11, No 3. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>
- Mercier D., Lesage J., Decoopman X., Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. *NDT & E International*. 2006. Vol. 39. P. 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.04.005>.
- Pedersen L.B., Magnusson K.Å., Zhengsheng Y. Eddy current testing of thin layers using co-planar coils. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2013. Vol.12. P.53–64. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00164000005>.
- Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
- Gruber G., Schweighofer B., Berger M., Leitner T., Kloesch G., & Wegleiter H. Eddy Current Position Measurement in Harsh Environments: A Temperature Compensation and Calibration Approach. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/s24051483>.
- Wang H., Liu Y., Li W., Feng Z. Design of Ultraprecise and High Resolution Eddy-Current Displacement Sensor System. Conference: IECON 2014-40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, At: Dallas, TX, USA. DOI:10.1109/IECON.2014.7048828.
- Wang S.-C., Xie B.-R., & Huang S.-M. Design and Analysis of Small Size Eddy Current Displacement Sensor. *Sensors*. 2022. Vol.22, No. 19. P. 7444. <https://doi.org/10.3390/s22197444>.
- Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
- García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors* 2011. Vol. 11. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
- Placko D., Dufour I. Eddy current sensors for nondestructive inspection of graphite composite materials. In *Proceedings of the IEEE Conference of the Industry Applications Society (IAS'92)*, Houston, TX, USA, October 1992. P. 1676-1682.
- Xu P., Huang S., Zhao W. Differential eddy current testing sensor composed of double gradient winding coils for crack detection. In *Proceedings of the*

- IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2010), Limerick, Ireland, February 2010. P. 59-63.
17. Lakhdari Ala Eddine, Cheriet A., Nacereddine El-Ghoul I. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. *IET Circuits, Devices & Systems*. 2019. Vol.13, No. I.2, P. 255-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>
 18. Libby H.L. Introduction to electromagnetic nondestructive test methods. Wiley-Interscience, New York, USA, 1971.
 19. Krahenbuhl L., Muller D. Thin layers in electrical engineering-example of shell models in analysing eddy-currents by boundary and finite element methods. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993. Vol. 29, No. 2. P.1450–1455. URL: <https://hal.science/hal-00082820v1/document>.
 20. Xue Z., Fan M., Cao B. and Wen D. A fast numerical method for the analytical model of pulsed eddy current for pipelines. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2020. Vol. 62, No 1. P. 27-33(7). DOI: 10.1784/insi.2020.62.1.27.
 21. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
 22. Thompson S. Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core. [Data set]. *Scholarsphere*. 2024. <https://doi.org/10.26207/3h14-4190>.
 23. Thompson S. MathWorks files for inductor with eddy currents in core. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core>.
 24. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. Vol. 21, No. 1.P. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
 25. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. Vol.57, No. 1.P. 88-95.
 26. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., & Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024., Vol. 18, No 1.P. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
 244. P. 213460. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213460>.
 2. Li M., Wang H., Liao Ml., Yang Y. Field Measurement and Retrieval Research of Multi-physics Micro-measurement Devices During the Drilling Process in Oil and Gas Wells. In: Zhou, K. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering*. ICCES 2024. Mechanisms and Machine Science. 2024. Vol. 168. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68775-4_65.
 3. Rodrigues N., Luis S. Rosado. Development of a miniaturized electrical conductivity gauge based on eddy currents testing. 2016. DOI:10.13140/RG.2.2.23860.17289.
 4. Harms J., & Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021. Vol.6, No 1. P. 37. <https://doi.org/10.3390/I3S2021Dresden-10103>.
 5. Zergoug M., Lebaili S., Boudjellal H., Benchaala A. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. *NDT & E International*. 2004. Vol. 37, P. 65–72. DOI:10.1016/j.ndteint.2003.09.002
 6. García-Martín J., Gómez-Gil J., & Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*. 2011. Vol.11, No 3. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>
 7. Mercier D., Lesage J., Decoopman X., Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. *NDT & E International*. 2006. Vol. 39. P. 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.04.005>.
 8. Pedersen L.B., Magnusson K.Å., Zhengsheng Y. Eddy current testing of thin layers using co-planar coils. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2013. Vol.12. P.53–64. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s001640000005>.
 9. Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
 10. Gruber G., Schweighofer B., Berger M., Leitner T., Kloesch G., & Wegleiter H. Eddy Current Position Measurement in Harsh Environments: A Temperature Compensation and Calibration Approach. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/s24051483>.
 11. Wang H., Liu Y., Li W., Feng Z. Design of Ultraprecise and High Resolution Eddy-Current Displacement Sensor System. Conference: IECON 2014-40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, At: Dallas, TX, USA. DOI:10.1109/IECON.2014.7048828.
 12. Wang S.-C., Xie B.-R., & Huang S.-M. Design and Analysis of Small Size Eddy Current Displacement

References

1. Hai W., He Y., Li Y., Shan Y., Wang C., Xue Q. Multi-element drilling parameter optimization based on drillstring dynamics and ROP model. *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol.

- Sensor. Sensors. 2022. Vol.22, No. 19. P. 7444. <https://doi.org/10.3390/s22197444>.
13. Song M., Li M., Xiao S., & Ren J. Research on the Influence of Geometric Structure Parameters of Eddy Current Testing Probe on Sensor Resolution. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 14. P. 6610. <https://doi.org/10.3390/s23146610>.
 14. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. Sensors 2011. Vol. 11. P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
 15. Placko D., Dufour I. Eddy current sensors for nondestructive inspection of graphite composite materials. In Proceedings of the IEEE Conference of the Industry Applications Society (IAS'92), Houston, TX, USA, October 1992. P. 1676-1682.
 16. Xu P., Huang S., Zhao W. Differential eddy current testing sensor composed of double gradient winding coils for crack detection. In Proceedings of the IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2010), Limerick, Ireland, February 2010. P. 59-63.
 17. Lakhdari Ala Eddine, Cheriet A., Nacereddine El-Ghoul I. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. IET Circuits, Devices & Systems. 2019. Vol.13, No. I.2, P. 255-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>
 18. Libby H.L. Introduction to electromagnetic nondestructive test methods. Wiley-Interscience, New York, USA, 1971.
 19. Krahenbuhl L., Muller D. Thin layers in electrical engineering-example of shell models in analysing eddy-currents by boundary and finite element methods. IEEE Transactions on Magnetics, 1993. Vol. 29, No. 2. P.1450–1455. URL: <https://hal.science/hal-00082820v1/document>.
 20. Xue Z., Fan M., Cao B. and Wen D. A fast numerical method for the analytical model of pulsed eddy current for pipelines. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2020. Vol. 62, No 1. P. 27-33(7).
a. DOI: 10.1784/insi.2020.62.1.27.
 21. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
 22. Thompson S. Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core. [Data set]. Scholarsphere. 2024. <https://doi.org/10.26207/3h14-4190>.
 23. Thompson S. MathWorks files for inductor with eddy currents in core.
a. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core>.
 24. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. Journal of Kryvyi Rih National University. 2023. Vol. 21, No. 1.P. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
 25. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., & Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. Mining Journal of Kryvyi Rih National University. 2023. Vol.57, No. 1.P. 88-95.
 26. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., & Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. Mining of Mineral Deposits. 2024., Vol. 18, No 1.P. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
- Morkun N. V., Azaryan A.A., Hryshchenko S. M., Ruban S. A., Gritsenko A. M., Gaponenko A. A. Formation of an information base for automated control of the well drilling process**
- A method of information support for automated control of the process of drilling wells in iron-bearing rocks based on electromagnetic eddy current conversion of sensing signals is proposed. When modeling the dependence of the eddy current sensor parameters on the characteristics of the medium under study, we used its transformer model in the form of two coils with air cores located at a certain distance above each other. The transformer model of the eddy current sensor adequately reflects the processes that occur in it when the electrical conductivity and magnetic permeability of the sample under study change. The primary circuit of the transformer model represents the measuring coil of the sensor. The test medium forms the secondary circuit of the transformer model. The impedance of the measuring coil depends on the physical, chemical, and textural properties of the medium under test, as well as on the operating frequency of the sensor current source. The real part of the impedance is determined by the resistance of the circuit in which eddy currents flow. The sensor impedance and the spectral characteristic of the measured signal can be used to evaluate the characteristics of the medium under study. The experimental platform and combined electromagnetic transducer were used to test the approach. The combined probe is placed above the medium in which the ultrasonic signal and eddy current signal are simultaneously excited and received. Modeling of the parameters of the combined probe allowed us to determine and formalize the relationship between the parameters of the measuring coil of the probe and the characteristics of the medium under study. The analysis has shown that the use of eddy-current transformation parameters in combination with ultrasonic measurements improves the results of recognizing the main mineralogical and technological types of iron-bearing ores of the operated deposit. The obtained results make it possible to increase the efficiency of automated control of the well drilling process in the extraction of iron ores using information*

on the physical and mechanical characteristics and geological structure of the drilled rock.

Keywords: *drilling, well, control, automation, characteristics, electromagnetic converter.*

Моркун Наталя Володимирівна – д-р тех. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com

Азарян Альберт Арамаісович – д-р тех. наук, проф., професор Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), azaryan325@gmail.com

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.наук., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних

технологій і систем, Державний податковий університет (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com

Рубан Сергій Анатолійович – к.тех.наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), aknt@knu.edu.ua

Грищенко Андрій Миколайович – к.тех.наук, доцент, доцент Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), s-grischenko@ukr.net

Гапоненко Альона Анатоліївна – аспірант Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), grischenko.ug@gmail.com Статтю подано 21.07.2025 р.

Стаття подана 04.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НАДРЕШІТНОГО ПРОДУКТУ ТОНКОГО ВОЛОГОГО ГРОХОЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Бобров Є.Ю.

MODELING THE DYNAMICS OF THE OVERFLOW PRODUCT IN FINE WET SCREENING OF IRON ORE

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Bobrov E.Y.

Грохочення або просіювання широко використовується у гірничій промисловості, для розділення частинок руди за крупністю. Величезний обсяг руди на гірничих підприємствах на регулярній основі піддається промислому просіюванню, тому дослідження кінетики процесу та оптимізація відповідної технології, має велике економічне значення. Вирішення зазначеної проблеми ускладнено наявністю багатьох робочих змінних та різноманітних збурюючих факторів, що визначають результати цієї технологічної операції. В першу чергу до них відносяться складний розподіл частинок руди за крупністю та щільністю, а також комплексний вплив на рух надRESHІТНОГО продукту різних динамічних робочих режимів просіваючої поверхні. Останнім часом для класифікації подрібненої руди на збагачувальних підприємствах все більш інтенсивно застосовуються грохоти тонкого вологого грохочення. Застосування для просіювання вологого матеріалу, тверда фаза якого включає частинки руди різної щільності і крупності, накладає додаткові вимоги до конструкції та налаштування відповідного робочого обладнання. При безперервному просіюванні, коли швидкість подачі рудного матеріалу на сито достатньо висока і він створює скупчений шар частинок певної товщини, наприклад, навколо секції подачі, лише частинки в шарі, що безпосередньо контактують з ситом, мають шанс пройти через отвори. Доки верхні шари здатні додавати частинки малого розміру до цього контактного шару, швидкість проходження матеріалу залишатиметься постійною. Коли матеріал рухається вздовж сита, і все більше частинок меншого розміру проходить через отвори, він стає більш диспергованим. При цьому частинки стають більш рухливими та «відокремленими», відбувається перехід від «скупченого» стану до «відокремленого» руху. Зазначені особливості значно ускладнюють задачу

формування ефективного автоматизованого керування цим процесом. Досліджена модель динаміки подрібненого рудного матеріалу на просіювачій поверхні грохота, що враховує адвекцію, дифузію, сегрегацію та перколяцію його частинок у шарі матеріалу. Використаний підхід дозволяє враховувати трансформацію гранулометричного складу частинок твердої фази надRESHІТНОГО продукту та його щільності в процесі руху по сити грохота і за рахунок цього покращити якість автоматизованого керування процесом.

Ключові слова: керування, автоматизація, грохочення, модель, характеристики, динаміка, вібрація.

Вступ. Розділення (класифікація) руди за крупністю її частинок є невід'ємною складовою технологічного процесу підготовки рудної сировини до металургійного переділку. Одним із поширених методів технічної реалізації такої класифікації є грохочення або просіювання подрібненої руди. Однак прогнозування результатів цієї операції стосовно полідисперсних гранульованих матеріалів у промислових масштабах залишається складною проблемою.

Існує велика кількість факторів, які впливають на стан грохота та ефективність просіювання. Однак у багатьох роботах визначається вирішальний вплив руху дискретних частинок на результати цієї операції [1, 2]. Зазначений фактор включає сегрегацію рудних гранул у шарі матеріалу та умови, за якими малорозмірні частинки наближаються до сита та зрештою проходять через отвори. Крім того, параметри вібрації, конструктивні

особливості та швидкість подачі вхідного матеріалу також впливають на умови просіювання та визначають отримані результати. Параметри вібрації складаються з амплітуди, частоти та кута вібрації. У свою чергу, до конструктивних параметрів відносяться ширина, довжина і нахил грохота, діаметр дроту та розмір отвору сітки.

У роботі [3] представлено результати дослідження механіки зіткнень та проникнення частинок для розуміння руху частинок та покращення теоретичного аналізу процесу просіювання, що поетапно поділяється на розпушення, стратифікацію, зіткнення та проникнення. Проникнення частинок має прямий вплив на ефективність просіювання. Авторами визначена ймовірність проникнення, а математичні залежності між проникненням частинок та параметрами вібрації встановлені за допомогою методу найменших квадратів. Зроблено висновок, що для отримання ідеальної ймовірності проникнення матеріалів амплітуда та частота повинні бути близько 3,0 мм та 25 Гц відповідно. Кут напрямку вібрації має лише незначний вплив на проникнення. Стадія процесу просіювання у часі від 0,1 до 0,7 с є основною областю для зіткнень та проникнення.

Сучасний підхід щодо моделювання багатозначних потоків розглядає рух кожної окремої частинки як наслідок усіх сил, що на неї діють [4]. Це дозволяє враховувати одночасне виникнення різних видів рухів та складний діапазон взаємодій, які можуть виникати між частинками одна з одною, між частинками та стінками, а також між частинками та міжвузловою рідиною. Основна перевага цього методу полягає в тому, що він моделює ефекти на рівні частинок. Відповідно існує менша потреба в глобальних припущеннях, а реакція збірки є прямим результатом моделювання.

Загальна модель грохочення має враховувати ефекти сегрегації, дифузії та адвекції рудного матеріалу в процесі його руху по ситі. Структура та динамічна поведінка гранульованих матеріалів є предметом вивчення у геотехнічній інженерії через їх значний вплив на проникність та механічні властивості досліджуваного середовища. Однак, сегрегація частинок, яка спричиняє значні структурні зміни, залишається недостатньо вивченою, особливо щодо її динамічної еволюції як у глобальних, так і в локальних процесах сегрегації [5].

Сегрегація гранульованих матеріалів - це складне явище, яке важко кількісно виміряти та

передбачити. Метод дискретних елементів (DEM) може бути корисним інструментом для прогнозування ефектів сегрегації та підтримки промислового дизайну. У цьому контексті дуже складною задачею є характеристика гранульованих твердих речовин, щоб забезпечити ключові параметри, необхідні для успішного моделювання процесів сегрегації. Тертя кочення, тертя ковзання та коефіцієнт відновлення є критичними параметрами, що потребують вивчення. У роботі [6] представлено експериментальний метод для характеристики сегрегації на вільній поверхні. Досліджено вплив різних властивостей частинок, зокрема форми та розміру, на сегрегацію некогезивних матеріалів. Експерименти показали, що розмір частинок має сильніший вплив на сегрегацію, ніж форма частинок.

У роботі [7] пропонується розглядати полідисперсний сегрегаційний потік при наявності як стаціонарної так і нестаціонарної сегрегації. Крім того застосовується полідисперсний підхід до полідисперсних матеріалів за густиною з однаковим розміром частинок. Прогнози моделі кількісно узгоджуються з експериментально перевіреним моделюванням методом дискретних елементів (DEM) як розмірно-полідисперсних, так і густино-полідисперсних сумішей, що мають рівномірний, трикутний та логарифмічно-нормальний розподіли.

Отже аналіз виконаних досліджень свідчить про визначальний вплив рух частинок матеріалу, що просіюється, на результати цього процесу. Але синтез моделі, що враховує особливості динаміки вологого грохочення подрібненої руди залишається проблемним питанням.

Метою статті є моделювання основних складових руху надRESHITного продукту тонкого вологого грохочення руди для покращення якості кінцевого продукту та підвищення ефективності керування цим процесом.

Викладання основного матеріалу. У процесі руху подрібненого рудного матеріалу по просіювачій поверхні відбувається адвекція, дифузія, сегрегація та перколяція його частинок у шарі матеріалу, частинки меншого розміру наближаються до сита і зрештою проходять через отвори [4].

Зміна розподілу частинок за крупністю на ситі під час перехідного процесу просіювання змінює склад матеріалу в різних шарах і зрештою впливає на загальну ефективність просіювання.

Отже моделювання динаміки руху матеріалу в процесі його просіювання має враховувати у потоці визначальне співвідношення рудного матеріалу кожного класу крупності [8]. З урахуванням цього відповідна модель процесу у частинних похідних виглядає наступним чином [9]

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}c_i) + \nabla \cdot \Phi_i = \nabla \cdot (\mathbf{D}\nabla c_i), \quad (1)$$

де $\nabla \cdot (\mathbf{u}c_i)$ - адвекція; $\nabla \cdot \Phi_i$ - сегрегація; $\nabla \cdot (\mathbf{D}\nabla c_i)$ - дифузія; c_i - концентрація i -го класу крупності частинок подрібненої руди; t - час; \mathbf{u} - поле швидкості; \mathbf{D} - тензор зіткнювальної дифузії.

Оскільки сегрегаційний потік будь-якого класу крупності i залежить від концентрації іншого класу j , ці рівняння пов'язані. Для різних полів потоку, система координат орієнтована так, що вісь x спрямована вздовж схилу потоку (вниз по схилу), вісь y - вздовж розмаху, вісь z - нормально до вільної поверхні, а швидкості $\mathbf{u} = (u, v, w)$ відповідають напрямкам $\mathbf{x} = (x, y, z)$. Для розв'язання цього набору рівнянь необхідно задати початкові умови, граничні умови потоку, поле швидкості \mathbf{u} , дифузію \mathbf{D} та сегрегаційний потік Φ .

Першу складову рівняння (1) - дифузію частинок рудного матеріалу в процесі його руху по сити, доцільно розглядати, як однорідну крайову задачу. Загальне рівняння дифузії має такий вигляд

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad a \leq x \leq b. \quad (2)$$

Початковою умовою є $c(x, 0) \leq c_0$, а крайовою умовою - $c(0, t) \leq 0$, $c(L, t) \leq 0$.

Використаний для моделювання дифузії метод скінченних різниць дає наближення $c_t^n \in R^n$ до розв'язку $c(x_i, t_n)$ у дискретних точках [10]

$$x_i = ih, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

$$t_n = nk, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

де $h \equiv \Delta x$ - ширина сітки у просторі; $k \equiv \Delta t$ - крок за часом.

Наближення до першої похідної за часом визначаються виразом

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} + \sigma(\Delta t). \quad (5)$$

Дискретизація $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ отримується з центральної різниці другого порядку в просторі

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \approx \frac{c_{i-1}^n - 2c_i^n + c_{i+1}^n}{\Delta x^2} + \sigma(\Delta x^2). \quad (6)$$

Відповідно

$$\frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} = D \frac{c_{i-1}^n - 2c_i^n + c_{i+1}^n}{\Delta x^2} + \sigma(\Delta t + \Delta x^2). \quad (7)$$

У спрощеному варіанті

$$c_i^{n+1} = \lambda c_{i-1}^n + (1 - 2\lambda)c_i^n + \lambda c_{i+1}^n, \quad (8)$$

де $\lambda = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2}$.

Розв'язок у новий момент часу, за умов $0 < \lambda \leq \frac{1}{2}$, є середньозваженим розв'язком у старий момент часу. Це означає, що якщо $c_{i+1}^n - c_i^n$ для всіх i , тобто [10]

$$(1 - 2\lambda)(c_{i+1}^{n+1} - c_i^{n+1}) = \lambda(c_i^n - c_{i-1}^n) + \lambda(c_{i+2}^n - c_{i+1}^n) > 0. \quad (9)$$

Рішення рівняння (2) реалізовано із застосування можливостей платформи Simulink® /MATLAB® [11,12].

На рис. 1 наведено графіки у безрозмірній формі параметрів (зміна відносно первісного значення) еволюції дифузії частинок подрібненої руди класу крупності c_i в їх шарі на поверхні сита.

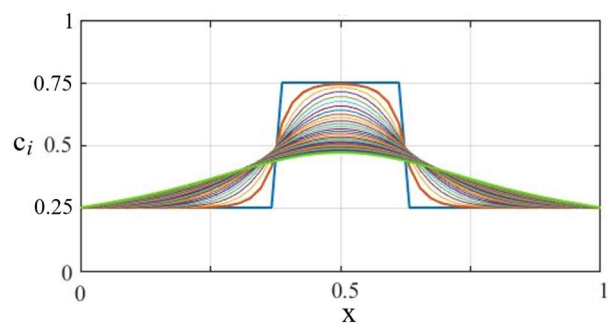


Рис. 1. Розвиток дифузії частинок рудного матеріалу класу крупності c_i в їх шарі на поверхні сита у часі.

Друга складова рівняння (1) - адвекція, визначає механізм перенесення рудного матеріалу шляхом його об'ємного руху. Властивості цього матеріалу переносяться разом з ним. Лінійне рівняння адвекції має вигляд

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (10)$$

з початковою умовою

$$c(x, t = 0) = f(x). \quad (11)$$

Рівняння (10) описує процес поширення форми хвилі зі швидкістю u , точно зберігаючи її початкову форму.

Розв'язок рівнянь (10) та (11) має вигляд [13]

$$c(x, t) = U(\xi) = f(x - ut); \quad \xi = x - ut. \quad (12)$$

Комбінований вплив нелінійної адвекції та дифузії на потік частинок подрібненої руди змодельований із застосуванням лінійного диференціальне рівняння у частинних похідних

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0, \quad (13)$$

де $u \frac{\partial c}{\partial x}$ - лінійний адвекційний член; $D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ - дифузійний член; $D, u > 0$.

Для початкової умови виду

$$c(x, 0) = Ue^{ikx} \quad (14)$$

та припущеного розв'язку виду $c(x, t) = f(t)e^{ikx}$, розв'язок (13) отримується шляхом підстановки.

Таким чином, маємо [13,14]

$$c(x, t) = Ue^{-Dk^2t} e^{ik(x-ut)}. \quad (15)$$

Розв'язок рівняння (15) у графічній формі для випадку, коли початкова концентрація c_i не змінюється (постійний потік вхідного матеріалу), наведено на рис. 2.

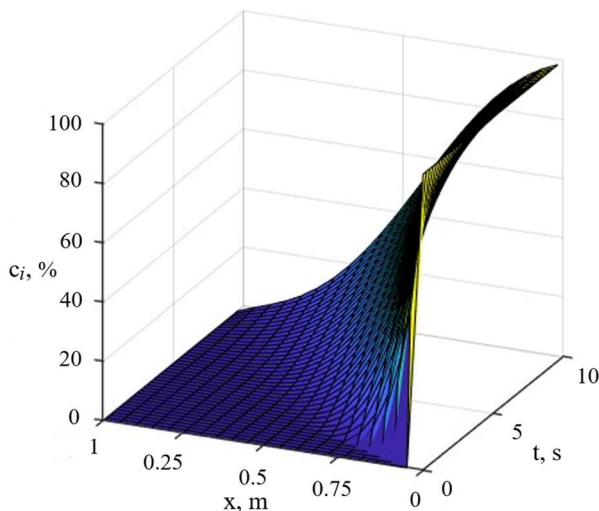


Рис. 2. Просторовий розв'язок рівняння адвекції-дифузії

Наведене рішення представляє собою дифузійну біжучу хвилю. Зокрема, елемент $e^{ik(x-ut)}$ описує гармонічну біжучу хвилю праворуч з хвильовим числом k та фазовою швидкістю u , а коефіцієнт Ue^{-Dk^2t} визначає спадаючу амплітуду.

Аналітичне рішення (13) можна отримати для початкової умови виду

$$c(x, 0) = \begin{cases} 1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x > 0 \end{cases}. \quad (16)$$

Фронт хвилі рухається праворуч зі швидкістю u , і його профіль втрачає свою різкість під впливом коефіцієнта дифузії D . Для достатньо малих значень часу можна задати такі граничні умови

$$c(-L/2, t) = 1, \quad c(L/2, t) = 0. \quad (17)$$

Використовуючи метод розділення змінних з (16), як початковою умовою, та (17), як граничними умовами, можна знайти точний розв'язок [14]

$$c(x, t) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[2n - 1 \frac{\pi(x-ut)}{L} \right] \frac{e^{-D(2n-1)^2 \pi^2 t / L^2}}{2n-1} \quad (18)$$

Третя складова рівняння (1) - сегрегація, обумовлена властивістю твердих частинок розділятися у просторі залежно від їхніх фізичних характеристик. Це явище широко зустрічається майже на всіх стадіях переробки рудних матеріалів і досить часто призводить до значних коливань якості кінцевих продуктів.

Вважається, що основними механізмами сегрегації сухих та вологих подрібнених матеріалів є: кочення, просіювання, ефекти відштовхування, ефекти кута природнього укусу, перколяція, зміщення, ефекти траєкторії руху, ефекти повітряного потоку, ефекти аерації та флюїдизації, ефекти удару [15].

Ефекти кочення та просіювання домінують у сегрегації купи. Більші частинки, що котяться по поверхні купи, створюють не засліплюючий екран, через який пробиваються менші частинки. Цей процес триває до вичерпання запасу дрібних частинок або доки більші частинки не зупиняться.

Ефект відштовхування найімовірніше виникає там, де задіяні частинки різної щільності. Наприклад, коли верхня частинка має вищу щільність, ніж дві нижні, вона прагне їх

відштовхнути. Це призводить до куп, де важчі частинки осідають поблизу центру купи, а легші біля стінки.

Вплив кута природного укусу виникає при змішуванні матеріалів. У цій операції дрібний продукт (менший кут природного укусу) та інший, більш грубий з більшим кутом природного укусу, засипають партіями, утворюючи купу для змішування. Коли до купи з продукту з великим кутом природного укусу додають наступну партію продукту з малим кутом природного укусу, то його частинки скочуються до краю купи.

Процеси перколяції та зміщення пояснюється вібраціями, що змушують частинки рухатися у товщі матеріалу, що вони утворюють. Зокрема, у роботі [16] стверджується, що спонтанна перколяція під дією сил тяжіння, відбувається при співвідношенні діаметрів частинок менше 0,1547 у бінарній сухій суміші. Це сприяє міграції невеликих частинок через шар більших частинок. Співвідношення розмірів, форма та шорсткість поверхні сприяють швидкості перколяції. Також перколяція залежить від загальної деформації та її швидкості при зіткненні частинок. Зміщення частинок різних розмірів відбувається завдяки створенню аномальних умов упаковки дрібних частинок навколо великої частинки під дією змін параметрів вібрації. Вважається, що перколяція та просіювання сухих сумішей дають подібні ефекти, але для перколяції не потрібен рухомий шар матеріалу [17].

Траєкторна сегрегація обумовлює те, що більші частинки, падаючи, наприклад, в процесі руху з похилого жолоба, розлітаються далі від кінця жолоба, ніж менші. Траєкторна сегрегація може посилюватися таким ефектами, як просочування або тертя.

Ефект повітряного потоку виникає, коли центрально у високий силос завантажують подрібнений продукт. Його частинки спричиняють потік повітря навколо потоку матеріалу, що падає. Якщо матеріал містить значну кількість дрібних частинок (10-100 мкм), вони будуть переноситися потоком повітря до бокової частини силосу, залишаючи центральну частину багатшим на грубіший матеріал.

Ефект аерації пов'язаний з властивістю твердих частинок утворювати флокули з повітряними пухирцями. Наслідком цього є те, що грубі частинки падають крізь шар (струм), тоді як аерований шар дрібних частинок залишається на поверхні і рухається вгору.

Сегрегація внаслідок удару відбуваються, коли частинки рухаються. Існують як міжчастинкові удари, так і удари між частинками та межами системи. Такі зіткнення або зупиняють дрібні частинки, або збільшують їхню швидкість. Це призводить до того, що дрібні частинки розподіляються по більшій площі, ніж грубі частинки.

Серед зазначених динамічних ефектів механічної взаємодії частинок слід звернути увагу на те, що різноманітні механізми сегрегації зазвичай діють різноспрямовано. Який з них буде домінувати в будь-якій даній ситуації, залежить від великої кількості параметрів. Ці параметри залежать як від природи частинок, так і від змінних процесу [18]. До них відносяться такі властивості частинок: розмір та розподіл розмірів, щільність, форма, модуль пружності, коефіцієнт тертя, текстура поверхні, когезивність, адгезія. Змінні процесу: швидкість подачі або заповнення, висота падіння, вплив розміру купи, співвідношення змішування, вплив вологості.

Наявність та властивості рідини (наприклад, щільність та в'язкість) у гранульованих потоках мають значний вплив на динаміку твердих частинок [19, 20]. Моделі сегрегації в сухих та вологих системах схожі, але сегрегація відбувається швидше у вологому випадку [8].

Математично сегрегація, тобто еволюція концентрації частинок певної крупності, може бути задана диференціальним рівнянням [9]

$$\Phi_i = u_p c_i, \quad (19)$$

де u_p – швидкість сегрегації чи перколяції.

Рівняння (1) набуває простої форми у гравітаційно-керованих потоках з вільною поверхнею, коли домінує потік сегрегації, нормальний до поверхні [21]. У цьому випадку дифузія суттєва лише в напрямку z , а глибина проточного шару значно менша за довжину потоку.

У випадку мультідисперсної структури з N різних частинок рівняння (1) перетворюється на набір з $N - 1$ диференціальних рівнянь у частинних похідних для $c_1 \dots c_{N-1}$, де $c_N = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} c_i$, коли об'ємна частка суміші є постійною.

За таких обставин швидкість сегрегації одного класу крупності в суміші з частинок різного розміру можна описати таким чином [22]

$$\omega_{\rho,i} = \dot{\gamma} \sum_{j \neq i} S_{i,j} c_j, \quad (20)$$

де кожен $S_{i,j}$ є шкалою довжини сегрегації для бідисперсної суміші частинок i та j [23]. Коли ця форма використовується для швидкості перколяції, рівняння (1) стає

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial(uc_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\omega c_i)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (\dot{\gamma} c_i \sum_{j \neq i} S_{i,j} c_j) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) \right) \right]. \quad (21)$$

Модель (20) можна включити до загального опису з точки зору щільності ймовірності $c(\mathbf{x}, t, \alpha)$, де α неперервна змінна, що описує відповідну властивість частинки (наприклад, розмір або щільність) [23]. Виходячи з випадку мультидисперсного (дискретного розподілу), швидкість сегрегації по нормалі до поверхні знову можна моделювати як суперпозицію швидкостей для всіх видів

$$\omega_{\rho}(\alpha) = \int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} S(\alpha, \beta) \dot{\gamma} c(\mathbf{x}, t, \beta) d\beta, \quad (22)$$

де $S(\alpha, \beta)$ - безперервна функція, визначена на основі сегрегації окремих бідисперсних сумішей.

Таким чином, рівняння (1) стає [9]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}c) + \frac{\partial}{\partial z} \int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} S(\alpha, \beta) \dot{\gamma} c(\mathbf{x}, t, \beta) c(\mathbf{x}, t, \alpha) d\beta = \nabla \cdot (D \nabla c) \quad (23)$$

Маючи відомі кінематичні характеристики потоку та конститутивні моделі для швидкості сегрегації та дифузії, моделі континуальної адвекції-дифузії-сегрегації для різних сумішей та з різними типами дисперсності частинок (наприклад, розмір, щільність та форма) можуть бути розв'язані в різних геометріях. Якщо, наприклад, припустити, що швидкість перколяції для частинок (змінюються лише за однією властивістю) задається виразом

$$\omega_{\rho,i} = \sum_{j \neq i} f [R_{\alpha}(i, j) c_j, \mathbf{u}], \quad (24)$$

де $f [R_{\alpha}(i, j) c_j, \mathbf{u}]$ описує бідисперсну суміш двох видів, i та j , зі співвідношенням $R_{\alpha}(i, j) = \alpha_i / \alpha_j$ властивості α при концентрації c_j та місцевих умовах потоку, визначених \mathbf{u} .

Тоді, для мультидисперсної суміші, де кожна речовина має різні фізичні властивості [8,9]

$$\omega_{\rho,i} = \sum_{j \neq i} c_j \sum_{\alpha} f [R_{\alpha}(i, j) c_j, \mathbf{u}]. \quad (25)$$

Для визначення параметрів сегрегації використовуються різні підходи, включаючи підгонку загальної швидкості сегрегації до аналітичних рішень [24], визначення миттєвої швидкості сегрегації як функції локальних властивостей потоку [25] та ін.

Для спрощення моделювання цих процесів застосовано математичне формулювання, яке зазвичай використовується для опису операцій розпаду та деградації [26]. Коли рудна суспензія завантажується на сито грохота відбувається декілька взаємопов'язаних процесів: матеріал просувається по ситі, відбувається поступове зневоднення, зменшення маси надрешітного продукту на одиницю довжини сита та збільшення його щільності. За рахунок вибіркового проходження частинок твердої фази через сито, а також руйнування рудних агрегацій змінюється її гранулометричний склад. Тобто можна вважати, що у відповідній моделі процесу у часі частина надрешітного продукту зникає, а частина змінює свої параметри, тобто перетворюється. Такий підхід визнає втрати маси q матеріалу пропорційними ступеню концентрації c

$$q = -\lambda c^n, \quad (26)$$

де n - порядок перетворення; λ - константа перетворення.

Конкретне значення λ залежить від усіх змінних середовища системи, що розглядається. Член втрати маси q , заданий формулою (26), підставляється в загальне рівняння (1) замість сегрегаційного потоку Φ

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c_i) - \nabla \cdot (\mathbf{u} c_i) - \lambda c_i^n. \quad (27)$$

Окремо ж ця складова визначається виразом

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\lambda c^n. \quad (28)$$

Випадок, коли втрати пропорційні концентрації відповідає $n = 1$, і розв'язок диференціального рівняння (28) становить

$$c = c_0 \exp(-\lambda t), \quad (29)$$

де $c_0 = c(t = 0)$ - початкова умова.

Як було наведено вище, гранулометричний склад надрешітного продукту та швидкість його зміни визначаються режимними параметрами процесу, до яких відносяться характеристики продукту і технологічні змінні. Фактично, відповідним чином сформований режим можна розуміти як спрощене правило, за яким зібрано взаємодію кількох складних процесів, і де λ – це зосереджений параметр, що їх визначає.

Диференціальне рівняння для стаціонарного стану отримується шляхом встановлення похідних за часом у рівнянні переносу (27) рівними нулю

$$\frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial c_i}{\partial x} - u \frac{\partial c_i}{\partial x} - \lambda c_i = 0. \quad (30)$$

Для аналітичного розв'язання диференціального рівняння (30) доречно записати його в іншій формі [26]

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} - \mu_1\right)\left(\frac{\partial}{\partial x} - \mu_2\right) = 0. \quad (31)$$

Параметри μ_1 та μ_2 отримуються шляхом порівняння коефіцієнтів у (30) та (31)

$$\mu_1 + \mu_2 = \frac{u}{D}, \quad \mu_1 \cdot \mu_2 = -\lambda/D. \quad (32)$$

В результаті отримуємо квадратне рівняння, яке має розв'язки

$$\mu_{1,2} = \frac{1}{2D} \left(u \pm \sqrt{u^2 + 4\lambda D}\right). \quad (33)$$

Тоді формула для загального розв'язку має вигляд

$$c(x) = \exp(\mu_2 x) \left(C_1 + C_0 \int \exp(\mu_1 x) \exp(-\mu_2 x) dx\right) = C_1 \exp(\mu_2 x) + \frac{C_0}{\mu_1 - \mu_2} \exp(\mu_1 x), \quad (34)$$

де C_1 – друга константа інтегрування.

Як C_0 , так і C_1 визначаються граничними умовами. Звичайна умова на вході $c(x = 0) = c_{in}$ призводить до виразів

$$C_1 + C_0/(\mu_1 - \mu_2) = c_{in} \quad \text{або} \quad C_1 = c_{in} - C_0/(\mu_1 - \mu_2). \quad (35)$$

У безрозмірній формі розв'язок (34) можна записати як [26]

$$\frac{c(\tilde{x})}{c_{in}} = \tilde{C}_0 \exp(\tilde{\mu}_1 \tilde{x}) + 1 - \tilde{C}_0 \exp(\tilde{\mu}_2 \tilde{x}), \quad (36)$$

з безрозмірною координатою $\tilde{x} = \frac{x}{L}$, $\tilde{\mu}_1 = \mu_1 L$, $\tilde{\mu}_2 = \mu_2 L$ та однією константою інтегрування \tilde{C}_0 .

В процесі досліджень моделювався процес руху первинної маси рудного матеріалу по поверхні сита. Гранулометричний склад рудного матеріалу задавався вмістом частинок подрібненої руди крупністю 150, 106, 74 та 45 мкм. Визначалась зміна щодо координати x/L концентрації відповідного класу крупності c_i відносно до його вхідного значення c_{in} у масі пульпового продукту, який завантажувався на поверхню сита. Моделювалась зміна масової концентрації твердої фази у вхідному продукті від 20 до 40%.

На рис. 3 наведено результати моделювання у середовищі MATLAB® зміни концентрації зазначених класів крупності руди у надрешітному продукті при грохоченні на ситі з розміром отвору 74 мкм.

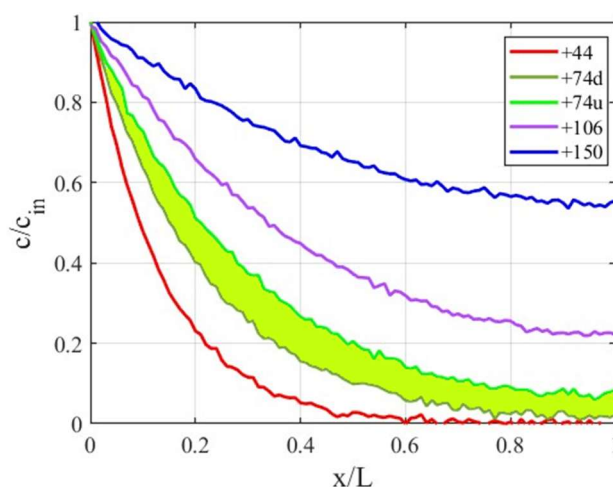


Рис. 3. Результати моделювання зміни концентрації визначених класів крупності руди у надрешітному продукті грохота

Для рудного матеріалу крупністю 74 мкм зеленим сектором визначено вплив зміни масової концентрації твердої фази у вхідному продукті з 20% (+74d) до 40% (+74u).

Аналіз наведеного підходу показав, що його застосування дозволяє змодельовати практично усю можливу динаміку рудного матеріалу під час його руху по ситі грохота та виходячи з отриманих результатів сформулювати відповідну стратегію автоматизованого керування процесом [27, 28].

Висновки. Динаміку подрібненого рудного матеріалу на просіювачій поверхні грохота визначають адвекція, дифузія, сегрегація та перколяція його частинок у шарі матеріалу. В результаті цих процесів його частинки наближаються до поверхні сита і зрештою частина з них проходять через отвори.

Досліджена модель дозволяє враховувати трансформацію гранулометричного складу частинок твердої фази надрешітного продукту та його щільності в процесі руху по сити грохота. Дисперсність крупності та щільності матеріалу, що просіюється, враховуються одним і тим самим співвідношенням. Механізми сегрегації частинок у шарі подрібненої руди, як правило, мають різноспрямований та різношвидкісний характер. Зменшення концентрації твердої фази у вхідному продукті сприяє підвищенню швидкості просіювання але зменшую продуктивність процесу. Збільшення швидкості просторового руху частинок у шарі подрібненої руди сприяє покращенню їх перколяції та збільшую вірогідність проходження через отвори сита. Особливо важливим є те, що це стосується частинок (у тому числі – складної форми), крупність яких наближена до розміру отворів.

У дослідженій моделі використано параметр, який у зосередженій формі представляє сукупність змінних, що визначають робочі режими грохота. Такий підхід дозволяє розглядати стратегію автоматизованого керування процесом грохочення руди, як послідовність операцій визначення робочих режимів та формування керуючих дій, що їм відповідають у просторі та часі.

Напрямок подальших досліджень слід вважати формування на основі дослідженої моделі такого руху частинок подрібненої руди на ситі, який забезпечить покращення якості кінцевого продукту та підвищення ефективності грохочення.

Література

1. Wang Z., Liu C., Wu J., Jiang H., Zhao Y. Impact of screening coals on screen surface and multi-index optimization for coal cleaning production. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 187. P. 562-575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.238>.
2. Wang G, Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 451-455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>.
3. Li Z., Tong X. A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen. *Int J Coal Sci Technol*. 2015. Vol. 2, P. 299–305. <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0089-7>.
4. Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieves - a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technology*. 2003. Vol. 133, No. 1-3. P. 190-202. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00092-5).
5. Dai Sheng Zhang, Feng Gao, Xuzhen He, Daichao Sheng. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism. *Computers and Geotechnics*. 2024. Vol. 169. P.106236. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106236>.
6. Combarros M., Feise H. J., Zetzener H., Kwade A. Segregation of particulate solids: Experiments and DEM simulations. *Particuology*. 2014. Vol. 12. P. 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.005>.
7. Deng Z., Umbanhowar P.B., Ottino J.M., Lueptow R. M. Modeling segregation of polydisperse granular materials in developing and transient free-surface flows. *American Institute of Chemical Engineers AIChE Journal*. 2019. Vol. 65. P. 882–893. <https://doi.org/10.1002/aic.16514>.
8. Fan Y., Schlick C.P., Umbanhowar P.B., Ottino J.M., Lueptow R.M. Modelling size segregation of granular materials: the roles of segregation, advection and diffusion. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 741. P. 252-279. DOI:10.1017/jfm.2013.680.
9. Umbanhowar P.B., Lueptow R. M. and Ottino J.M. Modeling Segregation in Granular Flows. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2019. Vol. 10. P. 129-153. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030122>.
10. Rahaman M. M., Sikdar M.M.H., Hossain M. B., Rahaman M.A., Jamal M. Hossain. Numerical solution of diffusion equation by finite difference method. *IOSR Journal of Mathematics (IOSR-JM)*. 2015. Vol. 11, No. 6 Ver. IV. P. 19-25. www.iosrjournals.org. DOI: 10.9790/5728-11641925.
11. Martinec D. MATLAB Central File Exchange. WaveBox. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51958-wavebox>. 2025.
12. Shankar S. Diffusion in 1D and 2D. MATLAB Central File Exchange. 2025.
13. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38088-diffusion-in-1d-and-2d>.
14. Graham W., Griffiths W., Schiesser E. *Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods with MATLAB and Maple*. Elsevier Science. 2012. ISBN: 978-0-12-384652-5.
15. Salih A., Burgers' Equation. Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Space Science and Technology, Thiruvananthapuram.

2016. https://iist.ac.in/sites/default/files/people/IN08026/Burgers_equation_viscous.pdf.
16. Mosby J., De Silva S. R., Enstad G.G. Segregation of Particulate Materials – Mechanisms and Testers. *KONA Powder and Particle Journal*. 1996. Vol. 14. P. 31-43. DOI:10.14356/kona.1996008.
 17. Bridgwater J., Ingram N.D. Rate of Spontaneous Interparticle Percolation. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1971. Vol. 49. P. 163-169. ISSN: 0046-9858.
 18. Williams J.C. The Segregation of Powders and Granular Materials. A Review. *Powder Technology*. 1963. Vol. 15, No. 2. P. 245-251. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80053-8](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80053-8).
 19. Mosby J. Segregation of Particulate Solids: Processes, Mechanisms and Counteractions. Tel-Tek report no. 43003-2, 1994.
 20. Liu P.Y., Yang R.Y. & Yu A.B. The effect of liquids on radial segregation of granular mixtures in rotating drums. *Granular Matter*. 2013. Vol. 15. P. 427-436. <https://doi.org/10.1007/s10035-013-0392-1>.
 21. Fiedor S.J., Umbanhowar P., Ottino J.M. Effects of fluid viscosity on band segregation dynamics in bidisperse granular slurries. *Physical Review E*. 2007. Vol. 76. P. 041303. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.041303>.
 22. Deng Z., Umbanhowar P. B., Ottino J.M., Lueptow R. M. Continuum modelling of segregating tridisperse granular chute flow. *Proceedings of the royal Society A*. 2018. Vol. 474, No. 2211. <http://doi.org/10.1098/rspa.2017.0384>.
 23. Gray J.M.N.T., Ancy C. Multi-component particle-size segregation in shallow granular avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*. 2011. Vol. 678. P. 535-588. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.138>.
 24. Schlick C.P., Isner A.B., Freireich B.J., et al. A continuum approach for predicting segregation in flowing polydisperse granular materials. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 797. P. 95-109. doi:10.1017/jfm.2016.260.
 25. Thornton A., Weinhart T., Luding S., Bokhove O. Modeling of particle size segregation: calibration using the discrete particle method. *International Journal of Modern Physics C*. 2012. Vol. 23, No. 08, P.1240014. <https://doi.org/10.1142/S0129183112400141>.
 26. Zhao Y., Xiao H., Umbanhowar P.B., Lueptow R. M. Simulation and modeling of segregating rods in quasi-2D bounded heap flow. *American Institute of Chemical Engineers. AIChE J.* 2017. Vol. 64. P. 1550-1563. <https://doi.org/10.1002/aic.16035>.
 27. Holzbecher E. *Environmental Modeling Using MATLAB R*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. P. 392. ISBN 978-3-540-72936-5.
 28. Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Shashkina A. A. & Bobrov E. Y. General principles of formalization of technological process control of mining production in a dynamic distributed system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. Vol. 4. P. 210-221. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-20>.
 29. Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко С.М., Грищенко Я.О. Моделювання комбінованого електромагнітного та електромеханічного приводу грохота для підвищення його ефективності. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, м. Київ*. 2025. Вип. 287, № 1. С. 46-56. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.

References

1. Wang Z., Liu C., Wu J., Jiang H., Zhao Y. Impact of screening coals on screen surface and multi-index optimization for coal cleaning production. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 187. P. 562-575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.238>.
2. Wang G, Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 451-455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>.
3. Li Z., Tong X. A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen. *Int J Coal Sci Technol*. 2015. Vol. 2, P. 299-305. <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0089-7>.
4. Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieves - a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technology*. 2003. Vol. 133, No. 1-3. P. 190-202. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00092-5).
5. Dai Sheng Zhang, Feng Gao, Xuzhen He, Daichao Sheng. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism. *Computers and Geotechnics*. 2024. Vol. 169. P.106236. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106236>.
6. Combarros M., Feise H. J., Zetzener H., Kwade A. Segregation of particulate solids: Experiments and DEM simulations. *Particuology*. 2014. Vol. 12. P. 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.005>.
8. Deng Z., Umbanhowar P.B., Ottino J.M., Lueptow R. M. Modeling segregation of polydisperse granular materials in developing and transient free-surface flows. *American Institute of Chemical Engineers AIChE Journal*. 2019. Vol. 65. P. 882-893. <https://doi.org/10.1002/aic.16514>.
9. Fan Y., Schlick C.P., Umbanhowar P.B., Ottino J.M., Lueptow R.M. Modelling size segregation of granular materials: the roles of segregation, advection and diffusion. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 741. P. 252-279. DOI:10.1017/jfm.2013.680.
10. Umbanhowar P.B., Lueptow R. M. and Ottino J.M. Modeling Segregation in Granular Flows. *Annual Review of Chemical and Biomolecular*

- Engineering. 2019. Vol. 10. P. 129-153. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030122>.
11. Rahaman M. M., Sikdar M.M.H., Hossain M. B., Rahaman M.A., Jamal M. Hossain. Numerical solution of diffusion equation by finite difference method. IOSR Journal of Mathematics (IOSR-JM). 2015. Vol. 11, No. 6 Ver. IV. P. 19-25. www.iosrjournals.org. DOI: 10.9790/5728-11641925.
 12. Martinec D. MATLAB Central File Exchange. WaveBox. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51958-wavebox>. 2025.
 13. Shankar S. Diffusion in 1D and 2D. MATLAB Central File Exchange. 2025.
 14. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38088-diffusion-in-1d-and-2d>.
 15. Graham W., Griffiths W., Schiesser E. Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods with MATLAB and Maple. Elsevier Science. 2012. ISBN: 978-0-12-384652-5.
 16. Salih A., Burgers' Equation. Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Space Science and Technology, Thiruvananthapuram. 2016. https://iist.ac.in/sites/default/files/people/IN08026/Burgers_equation_viscous.pdf.
 17. Mosby J., De Silva S. R, Enstad G.G. Segregation of Particulate Materials – Mechanisms and Testers. KONA Powder and Particle Journal. 1996. Vol. 14. P. 31-43. DOI:10.14356/kona.1996008.
 18. Bridgwater J., Ingram N.D. Rate of Spontaneous Interparticle Percolation. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1971. Vol. 49. P. 163-169. ISSN: 0046-9858.
 19. Williams J.C. The Segregation of Powders and Granular Materials. A Review. Powder Technology. 1963. Vol. 15, No. 2. P. 245-251. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80053-8](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80053-8).
 20. Mosby J. Segregation of Particulate Solids: Processes, Mechanisms and Counteractions. Tel-Tek report no. 43003-2, 1994.
 21. Liu P.Y., Yang R.Y. & Yu A.B. The effect of liquids on radial segregation of granular mixtures in rotating drums. Granular Matter. 2013. Vol. 15. P. 427-436. <https://doi.org/10.1007/s10035-013-0392-1>.
 22. Fiedor S.J., Umbanhowar P., Ottino J.M. Effects of fluid viscosity on band segregation dynamics in bidisperse granular slurries. Physical Review E. 2007. Vol. 76. P. 041303. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.041303>.
 23. Deng Z., Umbanhowar P. B., Ottino J.M., Lueptow R. M. Continuum modelling of segregating tridisperse granular chute flow. Proceedings of the royal Society A. 2018. Vol. 474, No. 2211. <http://doi.org/10.1098/rspa.2017.0384>.
 24. Gray J.M.N.T., Ancey C. Multi-component particle-size segregation in shallow granular avalanches. Journal of Fluid Mechanics. 2011. Vol. 678. P. 535-588. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.138>.
 25. Schlick C.P, Isner A.B, Freireich B.J, et al. A continuum approach for predicting segregation in flowing polydisperse granular materials. Journal of Fluid Mechanics. 2016. Vol. 797. P. 95-109. doi:10.1017/jfm.2016.260.
 26. Thornton A., Weinhart T., Luding S., Bokhove O. Modeling of particle size segregation: calibration using the discrete particle method. International Journal of Modern Physics C. 2012. Vol. 23, No. 08, P.1240014. <https://doi.org/10.1142/S0129183112400141>.
 27. Zhao Y., Xiao H., Umbanhowar P.B., Lueptow R.M. Simulation and modeling of segregating rods in quasi-2D bounded heap flow. American Institute of Chemical Engineers. AIChE J. 2017. Vol. 64. P. 1550-1563. <https://doi.org/10.1002/aic.16035>.
 28. Holzbecher E. Environmental Modeling Using MATLAB R. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. P. 392. ISBN 978-3-540-72936-5.
 29. Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Shashkina A. A. & Bobrov E. Y. General principles of formalization of technological process control of mining production in a dynamic distributed system. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2024. Vol. 4. P. 210-221. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-20>.
 30. Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Hryshchenko Y.O. Modeling of a combined electromagnetic and electromechanical drive for a screen to increase its efficiency. Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv. 2025. Vol. 287, No 1. P. 46-56. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
- Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Bobrov E.Y. Modeling the dynamics of the overflow product in fine wet screening of iron ore**
- Screening or sifting is widely used in the mining industry to separate ore particles by size. Huge volumes of ore at mining enterprises are regularly subjected to industrial screening, so studying the kinetics of the process and optimizing the corresponding technology is of great economic importance. Solving this problem is complicated by the presence of many working variables and various disturbing factors that determine the results of this technological operation. Firstly, these include the complex distribution of ore particles by size and density, as well as the complex influence on the movement of the oversize product of various dynamic operating modes of the screening surface. Recently, fine wet screening screens have been increasingly used for the classification of crushed ore at enrichment enterprises. The use of wet material for screening, the solid phase of which includes ore particles of different densities and sizes, imposes additional requirements on the design and adjustment of the corresponding working equipment. During continuous screening, when the feed rate of ore material to the screen is high enough, and it creates a*

concentrated layer of particles of a certain thickness, for example, around the feed section, only the particles in the layer that are in direct contact with the screen have a chance to pass through the openings. As long as the upper layers are able to add small particles to this contact layer, the material flow rate will remain constant. As the material moves along the screen and more and more smaller particles pass through the holes, it becomes more dispersed. At the same time, the particles become more mobile and “separated,” transitioning from a “clumped” state to “separated” motion. These features significantly complicate the task of forming effective automated control of this process. The model of the dynamics of crushed ore material on the screening surface of a vibrating screen was studied, taking into account the advection, diffusion, segregation, and percolation of its particles in the material layer. The approach used allows taking into account the transformation of the particle size distribution of the solid phase of the oversize product and its density during movement on the screen surface. This improves the quality of automated control of the process.

Keywords: *control, automation, screening, model, characteristics, dynamics, vibration.*

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Пір), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Бобров Євген Юрійович – аспірант, Криворізького національного університету (Кривий Пір), smgrischenko@gmail.com.

Стаття подана 15.07.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-67-74>

УДК 681.5:638.1:004.89: 519.87

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАСІКОЮ

Сотніков Д.О., Дубовський О.Р.

DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE INFORMATION SYSTEM FOR APIARY MANAGEMENT

Sotnikov D.O., Dubovskyi O.R.

У статті представлено концепцію створення комплексної інформаційної системи для ефективного управління промисловою пасікою в умовах сучасних економічних та екологічних викликів. Актуальність розробки зумовлена зростанням потреби у цифровізації бджільництва як в Україні, що є одним з лідерів з експорту меду, так і у світі, де відбувається активна інтеграція ІТ-технологій у агровиробництво. Розкрито структуру та функціональні модулі системи, які охоплюють ключові напрями бджільництва: облік кількісних і якісних характеристик бджолосімей, моніторинг їхнього фізіологічного стану, планування технологічних операцій, контроль медозбору та аналіз витрат. Основною метою розробки є оптимізація управлінських процесів, зниження трудомісткості робіт та мінімізація ризиків шляхом впровадження сучасних ІТ-рішень. Проведено детальний аналіз проблем, що впливають на продуктивність пасіки, з урахуванням біологічних, кліматичних, ветеринарних та організаційних аспектів. Запропоновано модульний підхід до побудови системи, що дозволяє здійснювати прогнозування розвитку бджолосімей та виявлення потенційних загроз на основі інтеграції великої кількості гетерогенних даних. Особливу увагу приділено застосуванню нечіткої логіки (fuzzy logic) як інструменту для формалізації експертного досвіду та інтуїтивних знань бджолярів, що дає можливість генерувати кількісні рекомендації на основі якісних оцінок. Продемонстровано приклади використання нечітких правил для оцінки сили бджолосімей, стану розплоду, прогнозування роїння, управління ризиками отруєнь пестицидами та діагностики захворювань. Показано, що розроблена система має потенціал інтеграції з IoT-пристроями, сенсорними мережами та мобільними додатками для отримання даних у режимі реального часу, що

відкриває можливості для формування інтелектуальної платформи підтримки прийняття рішень в галузі промислового бджільництва та забезпечує підвищення продуктивності, економічної ефективності та стійкості виробництва в умовах мінливого середовища. У висновках зазначено, що впровадження такої системи здатне значно підвищити рентабельність пасічного господарства та знизити вплив людського фактора на критичні процеси виробництва.

Ключові слова: інформаційна система, автоматизація, промислова пасіка, нечітка логіка.

Вступ. Промислова пасіка, на відміну від аматорської, стикається з низкою специфічних викликів, пов'язаних з її масштабом та комерційною орієнтацією.

Автоматизація пасіки, впровадження сучасних технологій та систем для моніторингу, контролю та управління бджолиними сім'ями й процесами на пасіці є потужним інструментом, що дозволяє вивести бджільництво на новий рівень. Актуальність цього напрямку зумовлена низкою економічних, екологічних та технологічних факторів. Традиційне бджільництво вимагає значних затрат часу та ручної праці. Автоматизація дозволяє зменшити трудомісткість: Системи моніторингу скорочують кількість необхідних оглядів вуликів. Пасічнику не потрібно фізично відкривати кожен вулик, щоб перевірити стан сім'ї, що особливо важливо для великих пасік. У зв'язку з цим, окремі елементи автоматизації досліджуються і впроваджуються на пасіках.

Розширюється коло пасік, які застосовують смарт-вулики. Датчики температури, вологості та звуку всередині вулика можуть сигналізувати про проблеми (хвороби, наявність кліща Варроа, втрата матки) задовго до того, як їх помітить людина під час огляду. Постійний моніторинг дозволив би вирішити цілу низку цих та інших проблем [1].

Автоматичні системи вентиляції та обігріву могли би допомогти підтримувати оптимальні умови у вулику, що є критично важливим під час зимівлі та в періоди різких перепадів температур. Більше того, збираючи дані про вагу вулика, температуру, активність бджіл, пасічник може аналізувати, які сім'ї є найпродуктивнішими, та робити селекцію.

Численні компанії пропонують "розумні" вулики (Smart Hives), обладнані датчиками температури, вологості, ваги, звуковими сенсорами та GPS-трекерами [2-4]. Ціла низка робіт спрямована на аналіз звукових частот всередині вулика [5, 6].

Все це свідчить, що автоматизація пасіки — це не просто тренд, а необхідна відповідь на сучасні виклики бджільництва. Вона дозволяє зробити галузь більш продуктивною, стійкою, менш ризикованою та привабливою для нового покоління пасічників, поєднуючи багатовіковий досвід із силою сучасних технологій.

Проте, аналіз різних джерел інформації, а також висновки експертів свідчать про те, що підходи та підсистеми, що використовуються для окремих вуликів не враховують деякі суттєві проблеми та не об'єднані в єдину систему [7].

Метою даної роботи є аналіз проблем, пов'язаних з функціонуванням промислової пасіки, та розробка комплексної системи керування такою пасікою.

Для створення інформаційної комплексної системи керування як пасікою в цілому, так і окремими етапами виробництва меду та інших продуктів бджолярства необхідно чітко сформулювати основні проблеми, розробити шляхи їх вирішення і вже на базі цього створити систему контролю і керування.

Основні проблеми, які виникають в процесі діяльності промислової пасіки, можна класифікувати за декількома ознаками. Одна з найбільш визначних — хвороби бджіл. Це, мабуть, найсерйозніша проблема для будь-якої пасіки, а для промислової — вона багаторазово посилюється через високу щільність бджолиних сімей. Для вирішення і контролю цієї проблеми необхідно розрізнити різновиди хвороб [8-15].

З іншого боку, одними з важливих абіотичних чинників є температура, вологість і світло. Саме добовий ритм освітлення обумовлює річну динаміку життєвих циклів (фотоперіодизм) тварин, в тому числі медоносною бджолою. Найбільше значення він має для зміни різних станів (активний стан, зимовий спокій), а також розмноження і роїння. Природно, що вплив світла може модифікуватися іншими абіотичними факторами, в першу чергу — температурою і вологістю — цими основними компонентами клімату, які істотно визначили початковий ареал медоносною бджолою. Як низькі, так і занадто високі значення цих факторів обмежують льотну активність медоносною бджолою. Також термогігрокрежим позначається на тривалості життя комах [16]. Тому аналіз має бути комплексним, враховувати вплив різноманітних факторів на характер захворювання.

Головний ворог бджіл у всьому світі — кліщ *Varroa destructor*. На великих пасіках боротьба з ним вимагає системного підходу, ротації препаратів та постійного моніторингу. Недостатній контроль може призвести до швидкого поширення кліща по всій пасіці та значних втрат сімей. Бактеріальні захворювання американський та європейський гнилець можуть швидко поширюватися між сім'ями, особливо при використанні спільного інвентарю або згодовуванні зараженого корму. Їх лікування складне, а в деяких випадках уражені сім'ї доводиться знищувати. Небезпечними є також вірусні захворювання. Вони часто переносяться кліщем варроа та ослабляють імунну систему бджіл, роблячи їх вразливішими до інших хвороб. Нозематоз — ще одна небезпека. Це грибкове захворювання вражає травну систему бджіл і особливо поширене в періоди тривалої несприятливої погоди та при низькій якості кормів. На промислових пасіках, які часто розташовані поблизу агрокультурних угідь, є також ризик масової загибелі бджіл від отруєнь пестицидами. Це вимагає тісної співпраці з фермерами та попереднього інформування про обробку полів.

Друга категорія проблем пов'язана безпосередньо з управлінням та логістикою. Масштаб промислової пасіки вимагає ефективних управлінських дій та логістики. Для створення ефективної системи керування пасікою необхідно враховувати наступні аспекти. По-перше, сезонність робіт. Бджільництво — це сезонний бізнес, що вимагає

інтенсивної праці в певні періоди (весна, літо). Це створює виклики з наймом та управлінням персоналом. По-друге, перевезення пасік (кочівля). Для збору меду з різних медоносів часто потрібно перевозити велику кількість вуликів. Це складна логістична операція, яка вимагає спеціалізованого транспорту, дозволів та значних затрат часу та ресурсів. По-третє, зберігання та переробка продукції. Великі обсяги меду, воску, пилку потребують значних складських приміщень, обладнання для відкачування та переробки, а також відповідних умов зберігання. Крім того, облік та документування, а саме ведення точного обліку кількості сімей, медозборів, захворювань, витрат та доходів є критично важливим для ефективного управління.

Промислова пасіка функціонує в умовах ринкової економіки. Тому важливим є врахування економічних та ринкових викликів. Так, наприклад, ціни на мед та іншу продукцію пасіки можуть коливатися залежно від врожаю, попиту та пропозиції на внутрішньому та світовому ринках. Зростаюча конкуренція, в тому числі з імпортною продукцією, може впливати на прибутковість. Витрати на утримання пасіки (корма, ліки, обладнання, паливо, зарплата працівників) можуть бути значними, це треба враховувати для ефективного виробництва. Для реалізації великих обсягів продукції потрібно мати надійні канали збуту, що може бути складним завданням. Крім того, врожай меду сильно залежить від погодних умов, тож нестабільність медозборів може призвести до значних коливань доходів від року до року.

Окремою категорією проблем є природні та кліматичні фактори. Навіть в межах одного сезону вони суттєво впливають на всі вищезгадані проблеми. Такі погодні аномалії як несподівані заморозки, затяжні дощі, посухи можуть негативно впливати на розвиток бджіл та медоноси, що призводить до зниження врожаю. Довгострокові зміни клімату можуть впливати на терміни цвітіння медоносів та загалом на екосистему, в якій функціонує пасіка.

Незважаючи на ці виклики, промислове бджільництво залишається важливою галуззю, яка не лише виробляє мед та іншу відповідну продукцію, але й забезпечує запилення сільськогосподарських культур.

Врахування зазначених проблем, покращення управління промисловою пасікою є ключовим для підвищення її ефективності, продуктивності та рентабельності. Це вимагає

комплексного підходу, що охоплює оптимізацію процесів, підвищення кваліфікації персоналу, використання аналітичних даних, а також впровадження сучасних технологій. Розглянемо ці основні напрямки для підвищення ефективності, які дозволять сформувати організаційну систему заходів підтримки ефективної роботи промислової пасіки.

Для забезпечення оптимізації виробничих процесів необхідно поєднувати організаційні заходи з технічними. Перший модуль: для стандартизації операцій необхідно розробити і впровадити чіткі протоколи для всіх основних робіт (огляд сімей, лікування, годівля, формування відводків, зимівля). Це забезпечує однорідність якості робіт та дозволяє ефективніше навчати персонал. Наступна складова (другий модуль) пов'язана з плануванням та графіками робіт. Створення детальних графіків робіт на весь сезон, що враховують біологічні цикли бджіл, медоноси та погодні умови дозволить оптимізувати використання робочої сили та ресурсів. Третій модуль - ефективне матководство. Налагодження власного матководчого господарства або співпраця з надійними постачальниками високоякісних маток є основою сильних та продуктивних сімей. Систематичний підхід до боротьби з хворобами (четвертий модуль) включає в себе розробку інтегрованої системи управління для запобігання шкідникам та хворобам. Цей блок включає регулярний моніторинг, ротацію препаратів, використання біологічних методів та санітарні заходи. П'ятий модуль – це оптимізація логістики. Ефективне планування кочівлі, маршрутів транспортування вуликів та продукції. Використання спеціалізованого транспорту та обладнання для завантаження/розвантаження. Шостий модуль – структура та персонал пасіки. Навчання та розвиток персоналу – важлива складова підвищення ефективності будь-якого виробництва [17-20].

Вона передбачає по-перше, регулярне підвищення кваліфікації: проведення тренінгів та семінарів для бджолярів з новітніх методів бджільництва, боротьби з хворобами, використання нового обладнання. По-друге, це - мотивація та система заохочень. Впровадження системи мотивації стимулює працівників до підвищення продуктивності та відповідальності. По-третє, розвиток командного духу та взаємодопомоги серед працівників створить сприятливе середовище для роботи.

При розробці сучасної комплексної системи управління застосовують різноманітні підходи для підтримки прийняття рішень та технології штучного інтелекту. Ці підходи дозволяють враховувати управління ризиками, а саме: страхування пасіки від природних катаклізмів, хвороб та крадіжок; питання диверсифікації продукції, щоб знизити залежність від одного виду продукції, тобто виробництво не тільки меду, а й іншої продукції (пиллок, прополіс, маточне молочко, віск, відводки). Сюди ж можна віднести встановлення тісних контактів з місцевими фермерами для узгодження графіків обробки полів пестицидами, що дозволяє мінімізувати ризик отруєння бджіл.

Критично важливим інструментом для сучасного управління пасікою, що дозволяє бджолярам приймати обґрунтовані рішення, оптимізувати процеси та покращувати загальну продуктивність є збір та аналіз даних. Перш за все це наступна інформація:

- Вага вулика (зміни в часі);
- Температура всередині вулика;
- Вологість;
- Кількість зібраного меду;
- Кількість та якість розплоду;
- Споживання корму;
- Час роїння;
- Наявність та кількість хвороб/шкідників;
- Дати обробки та використані препарати;
- Погодні умови (температура повітря, опади, швидкість вітру);
- Типи медоносів у зоні льоту;
- Дані щодо пасіки та її оснащення.

Для підвищення продуктивності важливо мати дані в режимі реального часу. Для цього забезпечується моніторинг стану вуликів [1]: збір даних про вагу вулика, температуру, вологість, активність бджіл та споживання корму дозволяє відстежувати здоров'я сім'ї. Різка зниження ваги може свідчити про хворобу або дефіцит корму, тоді як аномальні коливання температури можуть вказувати на перегрів або переохолодження. Аналіз даних про медоноси, погодні умови та інтенсивність льоту бджіл допомагає визначити найкращий час для відкачування меду, максимізуючи врожайність. Відстежуючи ознаки, що передують роїнню (наприклад, щільність бджіл, вік матки), можна вжити превентивних заходів, таких як відводки або розширення гнізда, щоб уникнути втрати бджіл. Аналіз даних про запаси корму у вулику

та потреби сім'ї дозволяє точно визначити, коли і скільки підгодовувати бджіл, запобігаючи надмірному або недостатньому годуванню [21]. Дані про сезонні цикли, розвиток сімей та погодні прогнози дозволяють оптимально планувати роботи на пасіці, такі як огляд вуликів, лікування, розширення або зимівля. В довгостроковій перспективі відстежуючи продуктивність різних маток і родин, можна виявляти найбільш продуктивні лінії бджіл для подальшого розведення; збір даних про вплив погодних умов на пасіку дозволяє адаптувати стратегії управління до мінливого клімату.

Крім того, аналізуючи витрати та доходи, можна оцінити рентабельність різних практик та інвестицій, та приймати рішення про подальший розвиток пасіки.

Використання сучасних технологій, таких як датчики, системи моніторингу та програмне забезпечення для аналізу даних, робить управління пасікою більш точним, ефективним та стійким.

Проаналізуємо складові впровадження сучасних технологій та автоматизації, які доцільно включити до комплексної системи керування пасікою.

1. Цифровізація обліку та моніторингу. Використання спеціалізованих програм або мобільних додатків для ведення детального обліку кожної бджолиної сім'ї (дата народження матки, сила сім'ї, медозбір, хвороби, лікування, планові роботи) дозволяє відстежувати динаміку розвитку, виявляти проблемні сім'ї та планувати дії.

Кожен вулик може мати унікальний QR-код або NFC-мітку, що дозволяє швидко отримувати доступ до його історії та вносити зміни під час огляду.

Встановлення датчиків ваги, температури, вологості всередині вулика дозволяє дистанційно моніторити стан сімей, прогнозувати медозбір, виявляти роїння або проблеми без частого відкриття вуликів.

2. Автоматизація окремих процесів. Автоматичні системи годівлі та поїння будуть особливо актуально для великих пасік, де ручна годівля може бути трудомісткою.

Необхідно також передбачити медогонки та обладнання з автоматизацією. Використання високопродуктивних медогонок та ліній для розпечатування рамок значно прискорює процес відкачування меду.

3. Дрони для обстеження території можуть використовуватися для пошуку медоносних угідь, оцінки їх стану та планування кочівлі.

4. Застосування принципів нечіткої логіки для забезпечення гнучкості системи керування пасікою в цілому.

Впровадження цих підходів дозволить промисловій пасіці працювати ефективніше, бути більш стійкою до викликів та досягати більших фінансових результатів.

В роботі [22] були сформовані концептуальні засади автоматизованого керування пасікою та запропоновані принципи побудови системи на її принципах (рис.1).

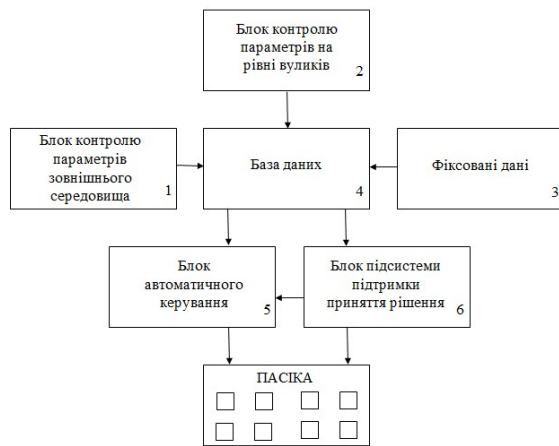


Рис.1. Концепція формування інформаційної бази для автоматизованого керування пасікою

Розглянемо більш детально застосування принципів нечіткої логіки для управління промисловою пасікою.

Нечітка логіка (Fuzzy Logic) – це потужний інструмент, який дозволяє працювати з невизначеністю та нечіткими даними, що часто зустрічаються в таких складних біологічних системах, як бджолині сім'ї [23]. Вона дає змогу моделювати людське мислення та прийняття рішень, коли інформація не є чіткою "так" або "ні". Застосування нечіткої логіки має значні переваги порівняно з чітким підходом. Вона дозволяє моделювати ситуації, де дані не є точними або повними. Система приймає рішення, подібні до тих, що приймає досвідчений бджоляр, використовуючи свій досвід та інтуїцію, та гнучко адаптується до нових даних або змінених умов. З іншого боку, нечітка система знижує залежність від людського фактора та допомагає стандартизувати прийняття рішень й зменшити вплив суб'єктивних оцінок.

Для промислової пасіки, де потрібно керувати сотнями або тисячами вуликів, застосування нечіткої логіки може значно

покращити ефективність управління, особливо у наступних аспектах.

1. Оцінка стану бджолиної сім'ї

Традиційні методи оцінки часто базуються на чітких порогах (наприклад, "менше 5 рамок розплоду – слабка сім'я"). Нечітка логіка дозволяє використовувати лінгвістичні змінні та ступені приналежності, що краще відображає реальність.

Вхідні лінгвістичні змінні:

Сила сім'ї: "дуже слабка", "слабка", "середня", "сильна", "дуже сильна", замість простого підрахунку рамок.

Кількість розплоду: "мало", "достатньо", "багато".

Медові запаси: "критично мало", "мало", "достатньо", "багато".

Активність льоту: "низька", "середня", "висока".

Поведінка бджіл: "спокійна", "збуджена", "агресивна".

Зараженість кліщем Варроа: "низька", "середня", "висока", "критична".

Правила нечіткої логіки (приклад):

ЯКЩО (Сила сім'ї є слабка) І (Медові запаси є мало), ТО (Потреба у підгодівлі є висока).

ЯКЩО (Кількість розплоду є висока) І (Температура є сприятлива), ТО (Ризик роїння є значний).

ЯКЩО (Зараженість кліщем є висока) І (Активність бджіл є низька), ТО (Потреба в лікуванні є термінова).

Вихідні змінні:

"Потреба у підгодівлі" (низька, середня, висока).

"Ризик роїння" (низький, помірний, значний, критичний).

"Потреба в лікуванні" (немає, бажано, терміново).

"Загальний стан сім'ї" (незадовільний, задовільний, добрий, відмінний).

2. Оптимізація графіку робіт та ресурсів

Нечітка логіка може допомогти у динамічному плануванні робіт на пасіці, враховуючи не тільки чіткі терміни, а й гнучкі умови.

Вхідні змінні:

Прогноз погоди: "холодно", "тепло", "спекотно", "дощитиме", "ясно".

Фаза цвітіння медоносів: "початок", "пік", "кінець".

Доступність персоналу: "низька", "середня", "висока".

Терміновість завдань: "низька", "середня", "висока".

Правила нечіткої логіки:

ЯКЩО (Прогноз погоди є тепло) І (Фаза цвітіння є пік), ТО (Пріоритет відкачки меду є високий).

ЯКЩО (Терміновість завдань є висока) І (Доступність персоналу є низька), ТО (Розглянути найм тимчасового персоналу є доцільно).

Вихідні змінні:

"Пріоритет завдання" (низький, середній, високий, критичний).

"Рекомендована дія" (підгодувати, розширити, лікувати, відкачати мед, об'єднати).

3. Управління ризиками (наприклад, ризик отруєння пестицидами)

Вхідні змінні:

Відстань до полів: "близько", "середньо", "далеко".

Тип культури: "зернові", "ріпак", "соняшник".

Наявність інформації про обробку: "немає", "часткова", "повна".

Вітер: "немає", "слабкий", "сильний".

Правила нечіткої логіки (приклади):

ЯКЩО (Відстань до полів є близько) І (Тип культури є ріпак) І (Наявність інформації є немає), ТО (Ризик отруєння є дуже високий).

ЯКЩО (Вітер є сильний) І (Наявність інформації є часткова), ТО (Рекомендована дія є закрити льотки або вивезти вулики).

Вихідні змінні:

"Рівень ризику" (низький, помірний, високий, критичний).

"Рекомендовані запобіжні заходи".

4. Діагностика захворювань

Нечітка логіка може допомогти у ранній діагностиці, враховуючи сукупність симптомів.

Вхідні змінні (симптоми): "наявність мертвого розплоду", "зміна кольору розплоду", "специфічний запах", "зменшення активності", "зміна поведінки матки". Кожен симптом може мати свій ступінь вираженості (наприклад, "слабкий", "помірний", "сильний").

Правила нечіткої логіки (приклади):

ЯКЩО (Наявність мертвого розплоду є значна) І (Зміна кольору розплоду є помірна), ТО (Підозра на гнилець є висока).

Вихідні змінні:

"Ймовірність захворювання" (дуже низька, низька, середня, висока, дуже висока).

"Рекомендації щодо подальших дій" (додатковий огляд, лабораторний аналіз, лікування).

Для впровадження нечіткої логіки на промисловій пасіці потрібна розробка програмного забезпечення, яке дозволить збирати дані, обробляти їх за правилами нечіткої логіки та надавати рекомендації. Це може бути інтегровано в загальну систему управління пасікою.

Застосування нечіткої логіки є перспективним напрямком для "розумного" бджільництва, дозволяючи більш ефективно та науково обґрунтовано управляти такою складною біологічною системою, як промислова пасіка.

Таким чином, на основі здійсненого аналізу проблем та шляхів їх вирішення, пропонується наступна інформаційна системи як складова автоматизованого керування промисловою пасікою (рис.2).

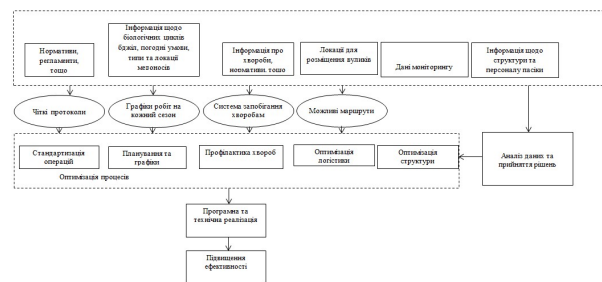


Рис. 2. Інформаційна система як складова автоматизованого керування промисловою пасікою

Наукова новизна роботи. У даній роботі вперше запропоновано концепцію комплексної інформаційної системи керування промисловою пасікою, що поєднує модульний принцип організації управління з технологіями нечіткої логіки для інтеграції експертного досвіду бджолярів у процес прийняття рішень. Розроблено структуру системи, яка враховує біологічні, ветеринарні, організаційні та економічні аспекти функціонування пасіки, та сформульовано приклади правил нечіткої логіки для оцінки стану бджолосімей, прогнозування роїння, діагностики захворювань і управління ризиками. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні методів нечітких множин з даними моніторингу реального часу, що створює передумови для впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у промислового бджільництві та дозволяє знизити вплив суб'єктивних факторів при управлінні пасікою, підвищити точність оцінок та ефективність виробництва.

Висновки. В роботі виконаний розгорнутий комплексний аналіз функціонування промислової пасіки, розглянуті організаційні, біологічні, метеорологічні та технічні аспекти управління пасікою. За результатами аналізу запропонована інформаційна система автоматизованого керування промисловою пасікою.

Література

1. Куч Остап, Лагун Ілона. Інтелектуальна IoT-система моніторингу пасіки. // Інформаційні технології у сфері захисту довкілля: колективна монографія / за заг. ред. Маєвського В., Приймака В., Ткачука Р. Львів: ННБК «АТБ», 2024.
2. Rsif-paset. Smart Bee Hiving Technology. URL: <https://www.rsif-paset.org/project/smart-bee-hiving-technology/>
3. The Best Bees Company. URL: <https://bestbees.com/smarhive-lp/>
4. Hive Beat. Smart beehive monitoring & Inspection tracking. URL: <https://www.hivebeat.co.uk/?srsltid=AfmBOookZjEQkypzPjQws7To3QRENe dC1Vd4HILbRDcY-FgLEQ0SjSXW>
5. Bromenshenk Jerry J., Henderson Colin B., Seccomb Robert A., Rice Steven D., Etter Robert T. Honey bee acoustic recording and analysis system for monitoring hive health. 2007. URL: <https://patents.google.com/patent/US7549907B2/en>
6. Єськов Е. К. Акустична сигналізація комах. М.: Знання, 1979. 63 с.
7. Kurkul. Онлайн-асистент фермера. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1695-rozumni-vuliki--chistiy-marketing-chi-maybutnye-bdjilnitstva>
8. Алексеєнко Ф. М., Ревенко В. А., Чепурко М. А. Справочник по болезням и вредителям пчел. 2-е изд. Київ: Урожай, 1991. 240 с.
9. Галатюк О. Є. Хвороби бджіл та основи бджільництва: навчальний посібник. Житомир: Полісся, 2006. 278 с.
10. Honey Bee Die-Off Alarms Beekeepers, Crop Growers and Researchers. Penn State University College of Agricultural Sciences, 29 січня 2007.
11. Dupont Gaëlle. Les abeilles malades de l'homme. Le Monde, 29 August 2007 (фр.)
12. Steinberger Petra. Das spurlose Sterben. sueddeutsche.de, 12 березня 2007 (нім.)
13. La mort des abeilles met la planète en danger / Paul Molga. Les Echos, 20 August 2007 (фр.)
14. JR Minkel. Mysterious Honeybee Disappearance Linked to Rare Virus. Scientific American. Science News, 7 вересня 2007.
15. Refkin Andrew C. Virus Is Seen as Suspect in Death of Honeybees. The New York Times, 7 вересня 2007.
16. Єськов Е. К., Єськова М. Д. Фізіологічні ефекти гіпоксії розвиваючихся і дорослих бджіл *Apis mellifera* L. Еволюція біохімії і фізіології, 2011, № 6. С. 475–479.
17. Саух П. Ю. Управління персоналом в аграрному секторі: теорія та практика. Київ: НУБіП України, 2018.
18. Мороз О. І. Мотивація персоналу в системі управління підприємством. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця., 2016.
19. Близнюк В. І. Психологія ефективної комунікації в аграрних колективах. Умань: Уманський НАУ. FAO, 2020.
20. Developing capacities in digital agriculture. FAO eLearning Academy. Maru, A., & Ballantyne, P., 2018.
21. Лозінський М. В., Глеваський В. І., Яковенко О. М., Устинова Г. Л. Основи бджільництва: навч. посібн. для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спец. 201 – Агрономія. Біла Церква, 2021. 148 с.
22. Дубовський О. Р., Сотніков Д. О. Концептуальні засади системи автоматизованого керування пасікою.
23. Bellman, R.E. and Zadeh, L.A. Decision Making in a Fuzzy Environment. Management Sciences, 1970, 17, 141-164. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>

References

1. Kuch O., Lahun I. Intelektualna IoT-systema monitorynhu pasiky // Informatsiini tekhnolohii u sferi zakhystu dovkillia: kolektyvna monohrafiia / za red. V. Maievskoho, V. Pryimaka, R. Tkachuka. Lviv: NNVK "ATB", 2024.
2. Rsif-paset. Smart Bee Hiving Technology. URL: <https://www.rsif-paset.org/project/smart-bee-hiving-technology/>
3. The Best Bees Company. URL: <https://bestbees.com/smarhive-lp/>
4. Hive Beat. Smart beehive monitoring & Inspection tracking. URL: <https://www.hivebeat.co.uk/?srsltid=AfmBOookZjEQkypzPjQws7To3QRENe dC1Vd4HILbRDcY-FgLEQ0SjSXW>
5. Bromenshenk J. J., Henderson C. B., Seccomb R. A., Rice S. D., Etter R. T. Honey bee acoustic recording and analysis system for monitoring hive health. 2007. URL: <https://patents.google.com/patent/US7549907B2/en>
6. Yeskov E. K. Akusticheskaya signalizatsiya nasekomykh. Moscow: Znanie, 1979. 63 s.
7. Kurkul. Onlain-assystent fermera. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1695-rozumni-vuliki--chistiy-marketing-chi-maybutnye-bdjilnitstva>
8. Alekseenko F. M., Revenok V. A., Chepurko M. A. Spravochnik po boleznyam i vreditelyam pchel. 2-e izd. Kyiv: Urozhai, 1991. 240 s.
9. Halatiuk O. Ye. Khvoroby bdzhil ta osnovy bdzhilnytstva. Zhytomyr: Polissia, 2006. 278 s.

10. Honey Bee Die-Off Alarms Beekeepers, Crop Growers and Researchers. Penn State University College of Agricultural Sciences, 29 January 2007.
11. Dupont G. Les abeilles malades de l'homme. Le Monde. 29 August 2007.
12. Steinberger P. Das spurlose Sterben. Sueddeutsche.de, 12 March 2007.
13. Molga P. La mort des abeilles met la planète en danger. Les Echos. 20 August 2007.
14. Minkel J. R. Mysterious Honeybee Disappearance Linked to Rare Virus. Scientific American. Science News, 7 September 2007.
15. Revkin A. C. Virus Is Seen as Suspect in Death of Honeybees. The New York Times, 7 September 2007
16. Yeskov E. K., Yeskova M. D. Fiziologicheskie efekty gipoksii razvivaushchikhsia i vzroslykh pchel Apis mellifera L. Evolyutsiya biokhimi i fiziologii. 2011. No. 6. S. 475–479.
17. Saukh, P. Yu. Personnel Management in the Agrarian Sector: Theory and Practice. Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2018.
18. Moroz, O. I. Personnel Motivation in the Enterprise Management System. Kharkiv: Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 2016.
19. Blyzniuk, V. I. Psychology of Effective Communication in Agrarian Collectives. Uman: Uman National University of Horticulture / FAO, 2020.
20. Developing capacities in digital agriculture. FAO eLearning Academy. Maru, A., & Ballantyne, P., 2018
21. Lozinskyi M. V., Hlevaskyi V. I., Yakovenko O. M., Ustynova H. L. Osnovy bdzhilnytstva: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spets. 201 – Ahronomiia. Bila Tserkva, 2021. 148 s.
22. Dubovskiy O. R., Sotnikov D. O. Kontseptualni zasady systemy avtomatyzovanoho keruvannia pasikoii.
23. Bellman, R.E. and Zadeh, L.A. Decision Making in a Fuzzy Environment. Management Sciences, 1970, 17, 141-164. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>.

Sotnikov D.O., Dubovskiy O.R. Development of a Comprehensive Information System for Apiary Management

The article presents the concept of developing a comprehensive information system for efficient management of an industrial apiary under modern economic and environmental challenges. The relevance

of the development is driven by the growing need for digitalization in beekeeping both in Ukraine, which is one of the leaders in honey exports, and globally, where active integration of IT technologies into agricultural production is taking place. The structure and functional modules of the system are described, covering key areas of beekeeping such as the accounting of quantitative and qualitative characteristics of bee colonies, monitoring their physiological state, planning technological operations, controlling honey collection, and analyzing expenditures. The main goal of the development is to optimize management processes, reduce labor intensity, and minimize risks by implementing modern IT solutions. A detailed analysis of problems affecting apiary productivity is carried out, taking into account biological, climatic, veterinary, and organizational aspects. A modular approach to system design is proposed, enabling forecasting of colony development and identification of potential threats based on the integration of large volumes of heterogeneous data. Particular attention is paid to the application of fuzzy logic as a tool for formalizing the expert experience and intuitive knowledge of beekeepers, which makes it possible to generate quantitative recommendations based on qualitative assessments. Examples of fuzzy rule applications are demonstrated for assessing colony strength, brood condition, swarming prediction, pesticide poisoning risk management, and disease diagnosis. It is shown that the developed system has the potential to integrate with IoT devices, sensor networks, and mobile applications for real-time data acquisition, opening opportunities for creating an intelligent decision support platform in industrial beekeeping to enhance productivity, economic efficiency, and production sustainability in a changing environment. The conclusions state that implementing such a system can significantly increase the profitability of apiary operations and reduce the impact of the human factor on critical production processes.

Keywords: information system, automation, industrial apiary, fuzzy logic.

Сотніков Данііл Олегович — аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, asp-151-22-413@snu.edu.ua.

Дубовський Олександр Романович – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, asp-122-22-430@snu.edu.ua.

Стаття подана 18.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-75-83>

УДК 681.5.015

ALGORITHM FOR IDENTIFYING OBJECTS MANAGED BY SECOND-ORDER LINKS WITH DELAY TIME

Gurin O.M., Duryshch O.A., Kobzarev E.V., Loria M.G.

АЛГОРИТМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ ЛАНКАМИ ДРУГОГО ПОРЯДКУ З ЧАСОМ ЗАПІЗНЮВАННЯ

Гурін О.М., Дуришев О.А., Кобзарев Є.В., Лорія М.Г.

The object of research is the optimal parameters for regulator adjustment and the quality indicators of transient processes.

The current problem is that modern technological processes are complex control objects. Therefore, when designing automation systems, the tasks of identifying the control object, calculating the regulator parameters, and their further optimization become particularly important. Optimal settings ensure the highest possible product quality and reduce its cost at a given production volume. Direct determination of controller parameters through experiments on a real object can lead to a loss of finished product quality and damage to raw materials and catalysts. To avoid these risks, the calculation algorithm was implemented in the Maple software package environment.

The study developed and tested an algorithm for identifying control objects with different characteristics of transient processes, described by second-order links, taking into account the delay time. Based on the obtained transfer functions of equivalent objects, P-, PI-, and PID-controllers (proportional, proportional-integral, and proportional-integral-derivative) were tuned. The parameters were determined using the triangle method, the method of undamped oscillations (Nicholas–Ziegler), and the proposed algorithm. The results obtained are intended for use in automatic control systems.

A comparative analysis of the quality of transient processes in systems tuned using different methods was performed. It was found that the parameters obtained using the new algorithm significantly improve the dynamic characteristics of the system (reduction of overshoot, control time, static and dynamic errors). In addition, an algorithm for searching for controller parameters taking into account the overshoot limitation was proposed, which also showed positive results. The identification error does not exceed 3%, which is acceptable for calculations of this type.

Keywords: *second-order link, controller parameters, control time, identification algorithm, transient process, delay time.*

1. Introduction. The continuous rise in global raw material prices has significantly increased production costs for Ukrainian enterprises. For example, in chemical industries, the share of natural gas expenses can account for up to 75% of total production costs. To maintain competitiveness in international markets, it is essential to use raw materials and energy resources more efficiently, which requires optimizing technological processes. Despite extensive technical modernization and improvements in control systems at many enterprises, these measures often prove insufficient if the core element of an automatic control system (ACS)—the controller—is improperly tuned. The controller generates the control signal to achieve the required accuracy and quality of the transient process, yet research indicates that more than 50% of industrial controllers are incorrectly adjusted [1].

Direct determination of optimal tuning parameters on a real system is associated with considerable risks: reduced product quality, damage to raw materials or catalysts, and even potential emergencies such as fires, explosions, or hazardous emissions. This highlights the importance of developing reliable theoretical methods for calculating optimal controller settings [2].

The object of the study is the optimal controller tuning and transient process quality indicators. The **subject of the study** is single-loop automatic control systems.

The main challenge arises from the complexity of modern technological processes, which makes tasks such as system identification, parameter calculation, and optimization of controller settings particularly critical. Properly optimized settings ensure high product quality and reduced production costs for a given output volume. However, performing experimental parameter searches directly on operating systems carries the risks mentioned above.

Existing tuning methods have significant shortcomings, and therefore experimental adjustment remains the most common practice, despite its limitations. System quality is usually evaluated not by instantaneous error functions—which are difficult to compute due to higher-order differential equations and dependence on multiple parameters—but by performance criteria. Among these, the integral quality criterion is considered the most universal, as it allows simultaneous evaluation of accuracy, stability, and response speed.

The aim of this research is to develop an algorithm for identifying control objects with time delay, based on the step response of a second-order system with delay. To achieve this goal, the following tasks were set:

- determine optimal controller settings using an integral quadratic optimization function with overshoot constraints;

- compare transient process quality indicators of automatic control systems tuned by different methods. Prior studies have emphasized the rapid dynamics of technological processes, the presence of disturbances caused by internal interactions and external conditions, and the time-dependent behavior of equipment, which all necessitate advanced ACS solutions [1, 2]. Some works approximate oscillatory transient processes using delayed oscillatory elements [3, 4], with further determination of the critical frequency and amplitude required for modeling second-order systems with delay. Research on system identification generally follows several approaches:

- least squares estimation [5];
- instrumental variables [6];
- frequency response identification [7];
- randomized algorithms [8];
- active identification with test signals [9, 10].

However, these methods often face challenges such as lack of guaranteed convergence, limited applicability in high-dimensional systems with numerous unknown parameters, and the high cost of specialized software.

Overall, the analysis confirms that the development of theoretical methods for calculating

optimal controller parameters is both highly relevant and promising. The proposed calculation algorithm was implemented in the *Maple* software environment. Importantly, transient processes of control objects—whether aperiodic or oscillatory—can be adequately described by a second-order differential equation [1].

Let us consider the structural diagram of a single-loop ACR shown in Fig. 1.

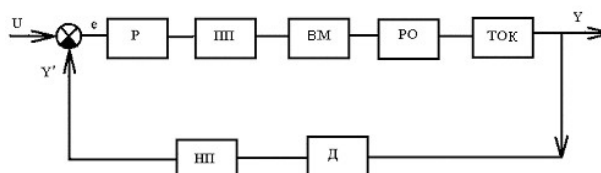


Fig. 1. Structural diagram of a single-loop automatic control system:

R – regulator; PP – intermediate converter;
VM – executive mechanism;

RO – control element; ТОК – technological control object; D – sensor; NP – standardizing converter

When measuring the acceleration curve on a real control object, the transition process of an equivalent control object is actually obtained (an open system from PP – intermediate converter to NP – normalizing converter, provided that the transfer function of the secondary device is equal to 1). That is, if the equivalent control object is identified by the acceleration curve as a second-order link, then the functional diagram of a single-loop ACS can be presented as follows (Fig. 2).

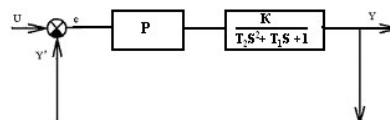


Fig. 2. Converted block diagram of a single-loop automatic control system

The differential equation of the second-order control link is as follows:

$$(T''')^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T' \frac{dy}{dt} + y = K_p u_0, \quad (1)$$

where T''' , T' – time constants; K_p – coefficient.

The nature of the transition process of this link depends on the value of the ratio $\frac{T'}{T'''}$.

If $\frac{T'}{T'''} \geq 2$, then the transition process will be aperiodic, and if $\frac{T'}{T'''} < 2$ – oscillatory.

Let us find the roots of the differential equation (1):

$$P_{1,2} = -\frac{T'}{2(T'')^2} \pm \sqrt{\left[\frac{T'}{2(T'')^2}\right]^2 - \frac{1}{(T'')^2}} \quad (2)$$

If $\frac{T'}{T''} > 2$, then the roots P1 and P2 will always be real and negative. Then the equation of the transfer function will be:

$$y(t) = K_p u_0 \left[1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_1 t) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_2 t) \right], \quad (3)$$

where $\alpha_1 = -P_1$; $\alpha_2 = -P_2$; u_0 – the disturbance is stepwise.

At $\frac{T'}{T''} < 2$ the root, they will be complex:

$$P_{1,2} = \alpha_0 \pm j\omega_0, \quad (4)$$

where $\alpha_0 = \frac{T'}{2(T'')^2}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{(T'')^2} - \left[\frac{T'}{2(T'')^2}\right]^2}$.

In this case, the transfer function is described by the equation:

$$y(t) = K_p u_0 \left[1 - \exp(-\alpha_0 t) \left(\cos \omega_0 t + \frac{\alpha_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right]. \quad (5)$$

Let us consider the identification of control objects using the example of a fifth-order link with a transfer function:

$$W = \frac{1}{1.5 \cdot s^5 + 4 \cdot s^4 + 10 \cdot s^3 + 10 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}. \quad (6)$$

Let's construct the acceleration curve (Fig. 3). To determine the delay time of the fifth-order link, we construct a tangent to the acceleration curve, as shown in Fig. 3, find the delay time, and substitute it into the transfer function of the fifth-order link (6):

$$W = \frac{e^{-2s}}{1.5 \cdot s^5 + 4 \cdot s^4 + 10 \cdot s^3 + 10 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}. \quad (7)$$

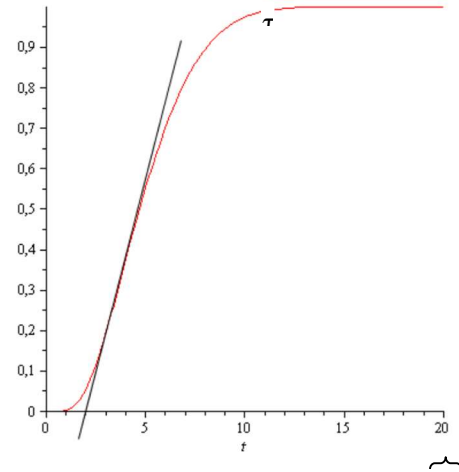


Fig. 3. Fifth-order link acceleration curve

We construct again the acceleration curve of the fifth order link, but now with a time delay (Fig. 4).

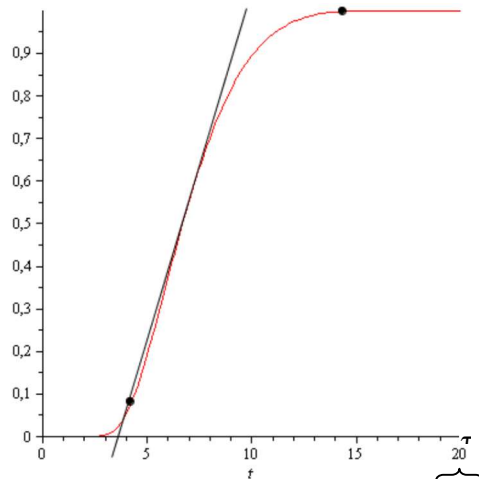


Fig. 4. Acceleration curve of a fifth-order link with delay time

By redrawing the tangent line (Fig. 4), the time delay for the second-order element was determined. As shown in Fig. 4, the step response curve exhibits an aperiodic character; therefore, equation (3) can be used to describe it.

The coefficient K is obtained directly from the step response curve ($K = I$). This equation still contains two unknown parameters, α_1 , α_2 . To determine them, two characteristic points are selected on the step response curve (their approximate location is indicated in Fig. 4).

Based on these selected points, a set of equations is formulated, which ultimately yields a system of equations for calculating the required parameters.

$$\begin{cases} 0.0368 = 1 \cdot u_0 \left[1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_1 \cdot 3.71) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_2 \cdot 3.71) \right], \\ 0.997 = 1 \cdot u_0 \left[1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_1 \cdot 14.35) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \exp(-\alpha_2 \cdot 14.35) \right], \end{cases} \quad (8)$$

We will solve the resulting system of two equations with respect to α_1 and α_2 . The easiest way to find these variables is using the Maple mathematical software package.

We find the variables α_1 and α_2 . We substitute these values into equation (3) to find the equation of the transfer function. After substitution, we obtain the following equation:

$$y(t) = 1 - 5.58 \cdot 10^5 \exp(-0.558 \cdot t) + 5.58 \cdot 10^5 \exp(-0.558 \cdot t). \quad (9)$$

Let us construct on the same graph the acceleration curve of the fifth order link and the curve corresponding to the obtained equation (9), Fig. 5.

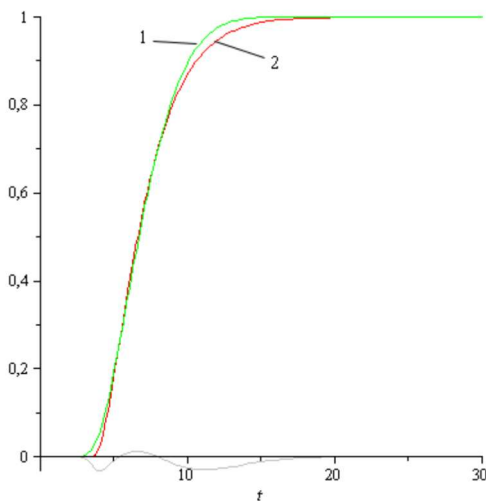


Fig. 5. Initial and obtained acceleration curves of the equivalent object:

1 – acceleration curve of the fifth-order link with delay time; 2 – transient process of the second-order link with delay time

Analyzing Fig. 5, we can conclude that the second-order aperiodic link with a delay time accurately describes the aperiodic control object with a delay time. The maximum deviation between curves 1 and 2 does not exceed 3%. Therefore, in further calculations, we will use a second-order link with a delay time instead of an equivalent control object. Let us perform the inverse Laplace transform of the equation to obtain its transfer function:

$$W = \frac{7.942 \cdot 10^9 \cdot e^{-3.6s}}{2.5 \cdot 10^{11} \cdot s^2 + 2.8 \cdot 10^{11} \cdot s + 7.784 \cdot 10^{10}}. \quad (10)$$

Thus, based on two points of the acceleration curve of an aperiodic control object with a delay time, it is possible to accurately identify its second-order aperiodic link with a delay time.

Let us consider the identification of control objects using the example of a fifth-order link, which has a transfer function:

$$W = \frac{1}{s^5 + 4 \cdot s^4 + 7 \cdot s^3 + 12 \cdot s^2 + 4.5 \cdot s + 1}. \quad (11)$$

Let's construct the acceleration curve (Fig. 6).

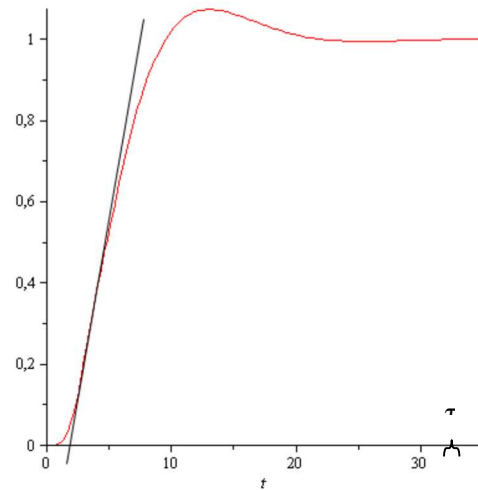


Fig. 6. Acceleration curve of a fifth-order link with delay time from the tangent line

To determine the delay time of the fifth-order link, we construct a tangent to the acceleration curve, as shown in Fig. 6. We find the delay time and substitute it into the transfer function of the fifth-order link:

$$W = \frac{e^{-2s}}{1.5 \cdot s^5 + 4 \cdot s^4 + 10 \cdot s^3 + 10 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}. \quad (12)$$

We construct again the acceleration curve of the fifth order link, but now with a time delay, as shown in Fig. 7.

When reconstructing the tangent (Fig. 7), the delay time for the second-order link was found.

Fig. 7 shows that the acceleration curve is oscillatory, so equation (5) can be used to find the equation of the acceleration curve.

The coefficient K is found from the acceleration curve (K=1). There are two more unknown parameters in this equation: α_0 and ω_0 . To find them, we take two points on the acceleration curve (Fig. 7) and select these points approximately as shown in Fig. 7.

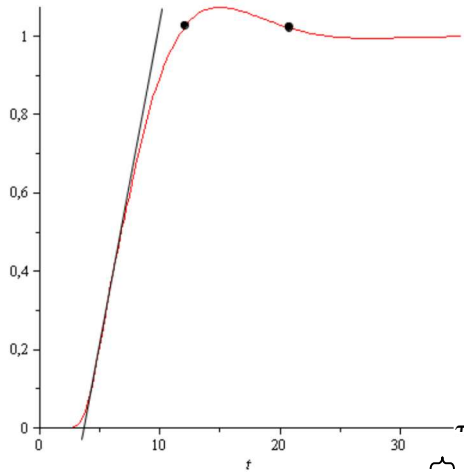


Fig. 7. Acceleration curve of a fifth-order link with delay time (oscillatory nature)

We compose equations for these two points. As a result, we obtain a system of equations:

$$\begin{cases} 1.025 = 1 \cdot u_0 \left[1 - \exp(-\alpha_0 \cdot 12.06) \left(\cos \omega_0 \cdot 12.06 + \frac{\alpha_0}{\omega_0} \sin \omega_0 \cdot 12.06 \right) \right], \\ 1.026 = 1 \cdot u_0 \left[1 - \exp(-\alpha_0 \cdot 20.21) \left(\cos \omega_0 \cdot 20.21 + \frac{\alpha_0}{\omega_0} \sin \omega_0 \cdot 20.21 \right) \right], \end{cases} \quad (13)$$

We will solve the resulting system of two equations with respect to α_0 and ω_0 . The easiest way to find these variables is using the Maple mathematical software package.

We find the variables α_0 and ω_0 . We substitute these values into the equations:

$$y(t) = K_p u_0 \left[1 - \exp(-\alpha_0 t) \left(\cos \omega_0 t + 0.1 \cdot \frac{\alpha_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right], \quad (14)$$

to find the equation of the transfer function. After substitution, we obtain the equation:

$$y(t) = 1 - \exp(-0.1935t) (\cos(0.2081t) + 0.093 \sin(0.2081t)). \quad (15)$$

Let us construct on the same graph the acceleration curve of the fifth order link and the curve corresponding to the obtained equation (15), Fig. 8.

Analyzing Fig. 8, we can conclude that the second-order oscillatory link with a delay time accurately describes the oscillatory control object with a delay time. The maximum deviation between curves 1 and 2 does not exceed 3%. Therefore, in

further calculations, we will use a second-order link with a delay time instead of an equivalent control object. Let's perform the inverse transformation of the Laplace equation to obtain its transfer function:

$$W = \frac{0.25 \cdot (1.74 \cdot 10^9 \cdot s + 8.1 \cdot 10^{18}) \cdot e^{-3.8s}}{2.5 \cdot 10^{19} \cdot s^2 + 9.675 \cdot 10^{18} \cdot s + 2.02 \cdot 10^{18}}. \quad (16)$$

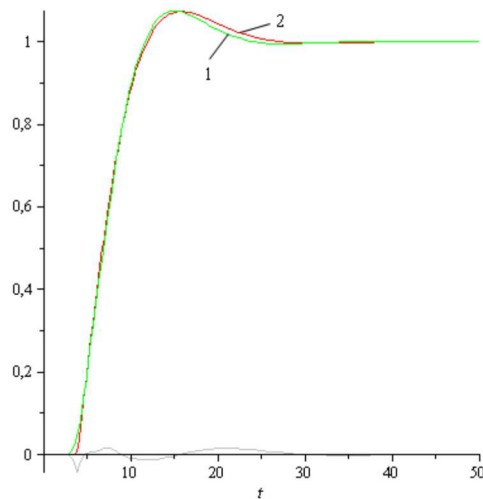


Fig. 8. Comparison of the initial and obtained acceleration curves of the equivalent object: 1 – acceleration curve of the fifth-order link with delay time; 2 – transient process of the second-order link with delay time

Thus, when studying automatic control systems in which complex technological processes are the control objects, the following conclusion can be drawn. The equivalent transfer function can be given in the case of an aperiodic acceleration curve with a delay time by an aperiodic second-order link with a delay time, and in the case of an oscillatory acceleration curve – by an oscillatory second-order link with a delay time. This will greatly facilitate the process of analyzing and optimizing the dynamic characteristics of the ACR.

Having obtained the transfer function of the equivalent object from the experimental acceleration curve, we can synthesize the ACR. Let us consider a single-loop ACR. Such an ACR, taking into account the transfer function of the equivalent object, can be represented as an ACR with unit feedback (Fig. 2).

Existing methods have a number of significant drawbacks, which is why experimental search is currently the most effective method of finding regulator settings in terms of optimal control.

The quality of any control system is determined by the magnitude of the error:

$$\varepsilon(t) = u(t) - y(t), \quad (17)$$

where $u(t)$ is the reference signal; $y(t)$ is the output signal (Fig. 9).

However, it is difficult to determine the error function $\varepsilon(t)$ for any given moment in time, since it is described by a high-order differential equation and depends on a large number of system parameters. Therefore, the quality of control systems is evaluated based on some of its properties, which are determined using quality criteria.

Among all known quality criteria, the most universal is the integral quality criterion, which evaluates the generalized properties of the ACS: accuracy, stability margin, and speed.

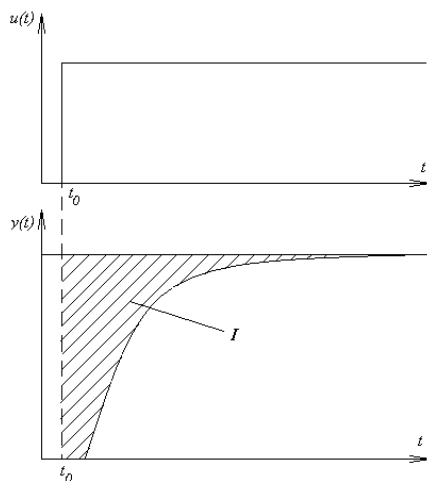


Fig. 9. Integral quality criterion

Therefore, the essence of this work is that an algorithm based on an integral quadratic optimization function has been developed, with the help of which the optimal regulator settings were calculated. The integral criterion proposed in [6, 7] provides a generalized estimate of the decay rate and the deviation of the controlled variable in the form of a single numerical value. It is found using the formula [5, 6]:

$$I = \int_0^T [y(t) - u(t)]^2 dt = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt, \quad (18)$$

where T is the control time.

This integral determines the square of the area between the setpoint $u(t)$ and the transient process curve $y(t)$. This integral will depend on the controller settings, i.e., in the case of a *PID* controller (proportional-integral-derivative controller), on the control coefficient K_p , the

integration time T_i , and the differentiation time T_d , $I = f(K_p, T_i, T_d)$. The proposed algorithm is based on solving an optimization problem: finding such values of K_p , T_i , T_d for which the quadratic integral criterion would be minimal

$$I = f(K_p, T_i, T_d) = \min. \quad (19)$$

These values of K_r , T_i , and T_d will be the optimal tuning parameters for the controller. For most processes, the integral criterion is a unimodal function, which makes it possible to apply the proposed algorithm.

The research results showed an improvement in the dynamic properties of the system when using the optimal controller settings calculated by the proposed method compared to the most common engineering methods for finding controller settings for CAP with aperiodic and oscillatory OK. Overshoot was reduced by 10 times, control time was reduced by 30%, and static and dynamic errors were reduced by 2–3 times.

A characteristic feature of an oscillatory process is overshoot. High overshoot is considered a disadvantage of automatic control systems and is completely unacceptable for some systems, as it causes system overload, etc. The permissible value of overshoot is determined by the specific operating conditions and the purpose of the ACS. Therefore, an important task is the synthesis of systems with specified (limited) quality indicators of the transient process.

In this work, we propose a developed algorithm for searching for controller settings with the introduction of a restriction on the overshoot of the transient process.

This algorithm consists in constructing the region of possible overshoot using the transformed formula (22):

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{ycm}}{y_{ycm}}, \quad (20)$$

$$y = 1 + \sigma, \quad (21)$$

$$y = \frac{y_{\max}}{y_{ycm}}. \quad (22)$$

After that, the area is limited by the required overshoot value (a line for a P-controller and a plane for PI and PID controllers) (Fig. 13).

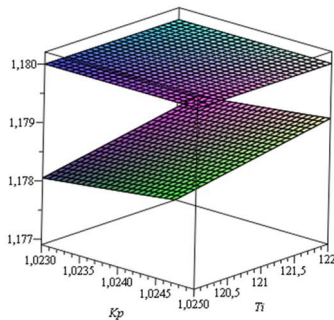


Fig. 13. Finding regulator settings with overshoot limitation

The intersection point of two planes (lines) will be the optimal tuning parameter of the controller with a given value of overshoot of the transient process.

Based on the analysis of the research results, it can be stated that the dynamic properties of the system improve when using the controller parameters calculated according to the proposed algorithm:

- reduction of overshoot by up to 10 times;
- reduction of control time by up to 10 times.

When analyzing systems with a P-controller, it is worth noting an increase in the amount of overshoot, but at the same time, the static error is reduced by 2–3 times compared to other methods.

Strengths. The paper proposes and investigates an algorithm for identifying control objects with different characteristics of transient processes, modeled by second-order links with delay time taken into account. The identification error does not exceed 3%, which is acceptable for calculations of this type. A comparative analysis confirmed that the regulator settings determined using the proposed algorithm significantly improve the dynamic properties of the system (overshoot, control time, static and dynamic errors). An algorithm for searching for controller parameters with a limitation on the amount of overshoot has also been developed and tested, which has shown positive results.

Weaknesses. The quality of the control system is determined by the magnitude of the error, but it is difficult to determine the error function at any given moment in time, since it is described by a high-order differential equation and depends on a large number of system parameters. Therefore, quality is usually assessed using criteria that reflect individual properties of the system.

A promising direction for further research is the improvement of the algorithm for searching for regulator settings with given, limited quality indicators of transient processes.

The results of the experiments confirmed the improvement of the dynamic characteristics of the system when using the optimal settings calculated by the proposed method, compared to common engineering methods for APC with aperiodic and oscillatory control objects. Oversteering was reduced by 10 times, the control time was reduced by 30%, and static and dynamic errors were reduced by 2–3 times. The implementation of the proposed control object identification algorithm does not require significant additional equipment costs. At the same time, there are many theoretical and experimental methods for tuning PID controllers. However, there is still no universal approach that would allow determining the optimal parameters for different types of systems.

Conclusions. An algorithm for identifying control objects with different characteristics of transient processes modeled by second-order links with delay time has been proposed and investigated. The identification error does not exceed 3%, which is acceptable for this type of task. Based on the obtained transfer functions of equivalent objects, the parameters of P-, PI-, and PID-controllers for ACS were determined using the triangle method, undamped oscillations (Nicholas–Ziegler method), and the proposed algorithm.

A comparative analysis of the quality indicators of transient processes in the studied ACS using different tuning methods was performed. It was found that the parameters determined by the proposed algorithm significantly improved the dynamic properties of the system, in particular, reduced overshoot, control time, as well as static and dynamic errors.

Л і т е р а т у р а

1. Verhaegen M. *Filtering and System Identification: A Least Squares Approach*. 2 nd ed. / M. Verhaegen, V. Verdult. Cambridge University Press, 2012. 422p. https://books.google.com.ua/books/about/Filtering_a_nd_System_Identification.html?id=vIOUuAAACAAJ&redir_esc=y
2. Soderstrom T. *Instrumental variable methods for system identification // Circuits, Systems and Signal Processing* / T. Soderstrom, P. Stoica. 2002. Vol. 21, Issue 1. Pp. 1–9. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01211647> https://sat.bntu.by/jour/article/view/64?locale=ru_RU
3. Loria M. *Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings* / M. Loria

- [// EURIKA: Physics and Engineering. 2019. № 2. P. 16–22. https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/864](https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/864)
4. Maryna Loriai, Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes / Olexii Tselishchev, Petro Eliseyev, Olga Porkuiian, Oleksandr Hurin, Alla Abramova, Sergii Boichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2022. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
 5. Driankov, D. Palm R. Advances in Fuzzy Control [Text] / D.Driankov, R.Palm // Physica-Verlag. Heidelberg. Germany - 1988. P. 129-137.
 6. Duryshv O. A., Study of the impact of discrete control of the cooling and condensation unit on the efficiency of ammonia production/Kobzarev E. V., Gurin O.M., Loriai M.G. //№ 4 (290) (2025): Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>
 7. Karakawa K., Abe N., Ichihara H. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay. SICE 2002. <http://dx.doi.org/10.1109/SICE.2002.1196548>

References

1. Verhaegen M. Filtering and System Identification: A Least Squares Approach. 2 nd ed. / M. Verhaegen, V. Verdult. Cambridge University Press, 2012. 422p. https://books.google.com.ua/books/about/Filtering_and_System_Identification.html?id=vIOUuAAACAAJ&redir_esc=y
2. Soderstrom T. Instrumental variable methods for system identification // Circuits, Systems and Signal Processing / T. Soderstrom, P. Stoica. 2002. Vol. 21, Issue 1. Pp. 1–9. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01211647> https://sat.bntu.by/jour/article/view/64?locale=ru_RU
3. Loriai M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings / M. Loriai // EURIKA: Physics and Engineering. 2019. – № 2. P. 16–22. <https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/864>
4. Maryna Loriai, Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes / Olexii Tselishchev, Petro Eliseyev, Olga Porkuiian, Oleksandr Hurin, Alla Abramova, Sergii Boichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2022. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
5. Driankov, D. Palm R. Advances in Fuzzy Control [Text] / D.Driankov, R.Palm // Physica-Verlag. Heidelberg. Germany. 1988. P. 129-137.
6. Duryshv O. A., Study of the impact of discrete control of the cooling and condensation unit on the efficiency of ammonia production/Kobzarev E. V., Gurin O.M., Loriai M.G. //№ 4 (290) (2025): Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu

imeni Volodymyra Dalia DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>

7. Karakawa K., Abe N., Ichihara H. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay. SICE 2002. <http://dx.doi.org/10.1109/SICE.2002.1196548>.

Гурін О.М., Дуришев О.А, Кобзарев Є. В., Лорія М. Г. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку

Об'єктом дослідження є оптимальні параметри налаштування регулятора та показники якості перехідних процесів.

Сучасна проблема полягає в тому, що сучасні технологічні процеси є складними об'єктами управління. Тому при проектуванні систем автоматизації особливо важливими стають завдання ідентифікації об'єкта управління, розрахунку параметрів регулятора та їх подальшої оптимізації. Оптимальні налаштування забезпечують найвищу якість продукції та зменшують її вартість при заданому обсязі виробництва. Пряме визначення параметрів регулятора шляхом експериментів на реальному об'єкті може призвести до втрати якості готової продукції та пошкодження сировини та каталізаторів. Щоб уникнути цих ризиків, алгоритм розрахунку було реалізовано в середовищі програмного пакета Maple.

У ході дослідження було розроблено та протестовано алгоритм ідентифікації об'єктів управління з різними характеристиками перехідних процесів, описаних зв'язками другого порядку, з урахуванням часу затримки. На основі отриманих передавальних функцій еквівалентних об'єктів було налагоджено P-, PI- та PID-регулятори (пропорційний, пропорційно-інтегральний та пропорційно-інтегрально-диференціальний). Параметри визначалися за допомогою трикутного методу, методу незгасаючих коливань (Ніколас-Зіглер) та запропонованого алгоритму. Отримані результати призначені для використання в системах автоматичного регулювання.

Було проведено порівняльний аналіз якості перехідних процесів у системах, налаштованих за допомогою різних методів. Було встановлено, що параметри, отримані за допомогою нового алгоритму, значно покращують динамічні характеристики системи (зменшення перевищення, часу регулювання, статичної та динамічної похибок). Крім того, було запропоновано алгоритм пошуку параметрів регулятора з урахуванням обмеження перевищення, який також показав позитивні результати. Похибка ідентифікації не перевищує 3 %, що є прийнятним для розрахунків такого типу.

Ключові слова: ланка другого порядку, параметри регулятора, час керування, алгоритм ідентифікації, перехідний процес, час затримки.

Гурін Олександр Миколайович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, gurin@ukr.net

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, duryshev@snu.edu.ua

Кобзарев Євген Володимирович – аспірант, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kobzarev@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Стаття подана 08.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-84-89>

УДК 623.438.3: 66.091

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГІЇ ІСКРОВОГО ЗАПАЛЮВАННЯ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮВАННЯ ДЕТОНАЦІЇ В ДЕТОНАЦІЙНІЙ ТРУБІ

Любарський Б.Г., Кривошеєв С.Ю., Єресько О.В.,
Галиця В.І., Сакун О.В., Любарський Д.Б.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SPARK IGNITION ENERGY ON THE DETONATION INITIATION PROCESS IN A DETONATION TUBE

Liubarskyi B.G., Kryvosheiev S.Y., Eresko O.V.,
Galitsa V.I., Sakun O.V., Liubarskyi D.B.

В роботі розглядається дослідження впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі для безпорохового міномету з керованою енергією пострілу. Показано, що успішні випробування продемонстрували дослідних зразків мінометів які демонструють можливість запуску снарядів без використання традиційних порохових зарядів, що підтверджує ефективність розробленої технології запуску. Система призначена для автоматичного заряджання та забезпечує можливість стрільби прямою наводкою. На відміну від звичайних мінометів, запропонована система використовує газодетонаційний заряд для регулювання дальності стрільби. Отже, дальність польоту снаряда контролюється не зміною кута піднесення міномета, а зміною енергії пострілу при збереженні фіксованого кута піднесення. Заміна порохового заряду горючою газовою сумішшю сприяє інтеграції системи керування пострілом міномета в ширшій системі керування вогнем. Це дозволяє створити новий режим напівпрямої наводки, що покращує тактичне розгортання зброї в умовах бою. Для переведення цієї технології у військове виробництво необхідні подальші дослідження та розробка спеціалізованої системи керування мінометом. Ключовими параметрами для контролю енергії пострілу міномета є початковий тиск та об'єм стисненого газового заряду в газодетонаційній камері. За результатами експериментальних досліджень виявлено вплив енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі. Дослідження проведено для 3-х діапазонів значень повної енергії іскрового розряду, що дорівнювали до 50 мДж, 0,84-1,54 Дж, 13-14 Дж. Розкид у значеннях повної енергії розряду пов'язаний

з відхиленням напруги само пробиття іскрового проміжку. На кожному із значень вимірювання здійснювалось не менше, ніж 3 рази. Встановлено, що збільшення енергії розряду призводить до скорочення відстані та часу переходу горіння у детонацію. Зокрема, у детонаційній трубі з внутрішнім діаметром 73 мм, що наповнена стехіометричною сумішшю пропан-бутана технічного з киснем, відбулось скорочення часу переходу горіння у детонацію з понад 1200 мкс до близько 200-300 мкс у разі зростання повної енергії іскрового розряду з 50 мДж до 13-14 Дж. При цьому, відстань переходу горіння у детонацію скоротилась з 299-413 мм до 185 мм.

Ключові слова: іскрового запалювання; ініціювання детонації; детонаційна труба; газодетонаційний заряд

Вступ. Оперативний досвід міських боїв показав, що танки, БМП та бронетранспортери широко використовуються для прориву оборони противника [1–3]. Однак танки за своєю суттю погано пристосовані для міських боїв через обмежений кут піднесення їхньої основної зброї – гармати. Тому військові, які мають попередній досвід міських операцій, провели модернізацію своїх основних броньованих платформ для підвищення ефективності в умовах міст [4–6]. Наприклад, після іракської кампанії Велика Британія модернізувала танк Challenger II, інтегрувавши міномет як допоміжну зброю. Таку модифікацію, було продемонстровано під час армійського бойового експерименту 2018 року. Міномет був встановлений на башті, що

забезпечувало непряму вогневу підтримку. Аналогічно, ізраїльський танк Merkava має стаціонарний 60-мм протипіхотний міномет у своєму броньованому корпусі зі спеціальним вогневим портом у башті. Ці міномети здатні запускати як протипіхотні, так і димові боеприпаси. На відміну від цього, українська бронетехніка оснащена лише димовими гранатометами, ефективна дальність стрільби яких обмежена приблизно 300 метрами – недостатньо для забезпечення повного димового прикриття під час маневреної війни [1].

У Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» розроблено інноваційний безпороховий міномет із регульованою енергією пострілу, а також створено повнофункціональний експериментальний прототип. Польові випробування підтвердили можливість запуску снарядів без традиційних порохових зарядів, тим самим підтвердивши запропоновану технологію руху [7–10]. Система має автоматичне заряджання та підтримує стрільбу прямою наводкою. На відміну від звичайних мінометів, така конструкція використовує газодетонаційний заряд для керування дальністю, що дозволяє регулювати її шляхом зміни енергії пострілу, зберігаючи при цьому постійний кут піднесення. Заміна порохового заряду горючою газовою сумішшю також дозволяє безперешкодно інтегрувати систему керування міномету. Таке нововведення дозволяє використовувати режим напівпрямої наводки, що забезпечує покращену тактичну гнучкість у бою.

Для перенесення цієї концепції у військове виробництво необхідні подальші дослідження щодо розробки спеціалізованої системи керування мінометом. Важливими показниками для регулювання енергії пострілу є початковий тиск та об'єм стисненого газу в детонаційній камері. На ці фактори впливають параметри впорскування газу, що описано в [11], а також метод запалювання [12–20]. Дослідження впливу енергії запалювання на скорочення відстані та часу, необхідних для переходу від горіння до детонації, що залишається ключовим науковим завданням [12–14].

Метою роботи є визначення впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення досліджень застосовано експериментальне обладнання, що представлено на рис. 1.

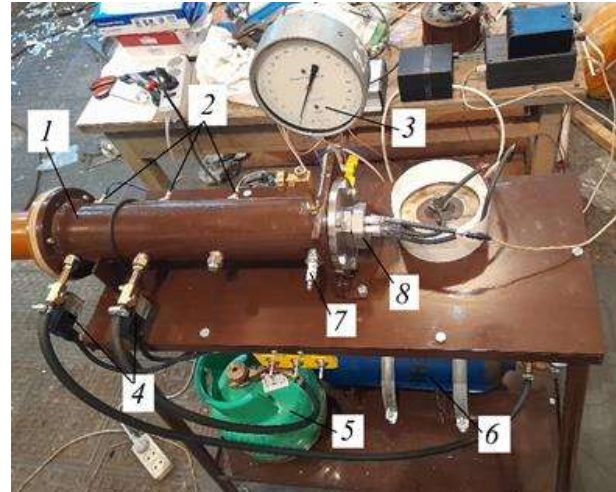


Рис. 1. Експериментальне обладнання для дослідження впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі: 1 – детонаційна труба; 2 – п'єзо датчики тиску; 3 – зразковий манометр; 4 – електромагнітні клапани; 5 – пропановий балон; 6 – кисневий балон; 7 – свічка запалювання; 8 – розрядні електроди

Експериментальне обладнання включало детонаційну трубу з системою іскрового запалювання та вимірювальний комплекс. Детонаційна труба являла собою сталеву трубу з товщиною стінки 7 мм та внутрішнім діаметром 73 мм. Довжина труби дорівнювала 430 мм. З одного торця труба герметично закривалась. З закритої сторони труби розміщувалась автомобільна свічка запалювання та два іскрові електроди, що вводились в трубу. До автомобільної свічки запалювання підключалась автомобільна система запалювання. До розрядних електродів підключався високовольтний конденсатор Electronicon E51.R35-30R20 ємністю 0,3 мкФ. Автомобільна свічка запалювання не використовувалась для розряду конденсатора, бо вона має внутрішній опір, який суттєво обмежує введення енергії в іскровий розряд. З протилежної сторони труби до торця труби приєднувався фланець з отвором, до якого прикручувалось притискне кільце. Діаметр отворів в кільці та фланці дорівнювали 73 мм. Між кільцем та фланцем встановлювалась розривна мембрана, що витримувала тиск до $\pm 0,2$ МПа. Розривна мембрана застосовувалась для герметизації детонаційної труби на час формування горючої суміші.

Дослідження проведено для 3-х діапазонів значень повної енергії іскрового розряду, що дорівнювали до 50 мДж, 0,84–1,54 Дж, 13–14 Дж. Розкид у значеннях повної енергії розряду пов'язаний з відхиленням напруги само

пробиття іскрового проміжку. На кожному із значень вимірювання здійснювалось не менше, ніж 3 рази.

За результатами вимірювань отримано суттєвий вплив енергії іскрового розряду на час та відстань переходу горіння у детонацію (ПГД). Результати таких вимірювань відображено на рис. 2-4.

З отриманих результатів дослідження маємо, що за повної енергії іскрового розряду до 50 мДж тільки на 3-му датчику спостерігаємо ударну хвилю (рис. 2). Тобто, перехід горіння у детонацію відбувся між 2-м та 3-м датчиками тиску, що складає 299-413 мм. На наведеній осцилограмі час ПГД складає понад 1200 мкс.

Зростання повної енергії розряду до 0,84-1,54 Дж призвело до появи детонаційної хвилі вже на 2-му датчику (рис. 3). Тобто, перехід горіння у детонацію відбувся між 1-м та 2-м датчиками тиску, що складає 185-299 мм. На наведеній осцилограмі час ПГД складає близько 800 мкс.

Подальше збільшення повної енергії розряду до 2,1-2,3 Дж супроводжувалось появи детонаційної хвилі вже на 1-му датчику (рис. 4). Таким чином, відстань ПГД скоротилась до 185 мм, а час цього процесу склав близько 300 мкс.

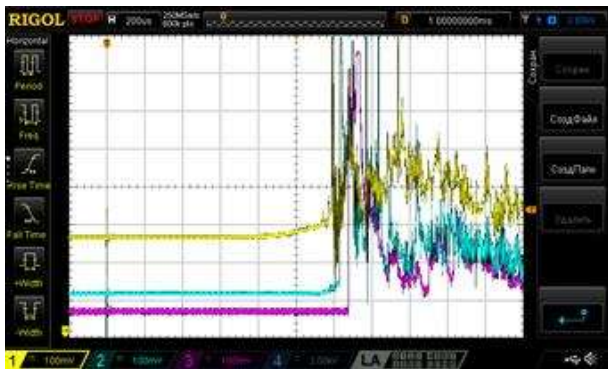


Рис. 2. Типова осцилограма тиску у різних точках вимірювання за повної енергії розряду до 50 мДж

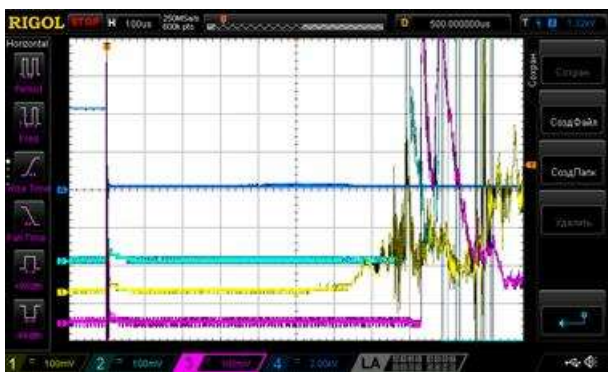


Рис. 3. Типова осцилограма тиску у різних точках вимірювання за повної енергії розряду 0,84-1,54 Дж

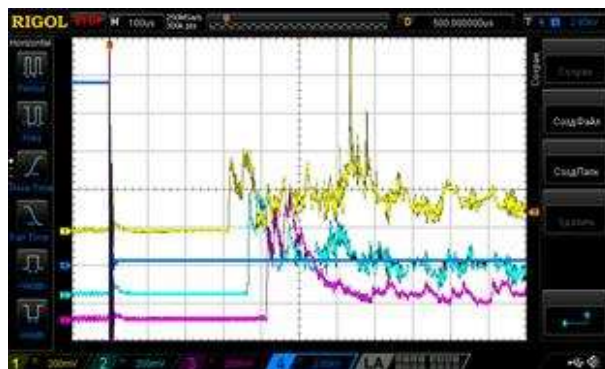


Рис. 4. Типова осцилограма тиску у різних точках вимірювання за повної енергії розряду 13-14 Дж

Повторення вимірювань за однакових умов призводило до не суттєвого розкиду результатів вимірювання, що відображено в таблиці.

Таблиця

Залежність відстані та часу переходу горіння у детонацію від повної енергії іскрового розряду

№ досліджу	Повна енергія, Дж	Час ПГД, мкс	Відстань ПГД, мм
1	до 0,05	1300	299-413
2		1280	
3		1250	
4	1,35	640	185-299
5	1,35	800	
6	1,35	820	
7	0,84	870	
8	1,536	870	
9	1,35	910	
10	13,54	275	
11	13,82	315	
12	14,11	255	
13	12,97	333	
14	13,54	282	
15	13,82	375	
16	13,25	290	
17	13,82	310	
18	13,82	500	185-299
19	13,82	180	до 185

Отримані результати свідчать про доцільність підвищення повної енергії розряду у газодетонаційному мінометі для підвищення стабільності пострілів в умовах розширення стисненого горючого заряду під час його подавання до ствола міномету.

Подяка. Робота виконана за фінансової підтримки Національного Фонду Досліджень України. Реєстраційний номер проєкту: 2023.04/0101, «Автоматизований привід наведення та система управління газодетонаційного міномету для пострілу димовими мінами».

Висновок. За результатами експериментальних досліджень виявлено вплив енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі. Встановлено, що збільшення енергії розряду призводить до скорочення відстані та часу переходу горіння у детонацію. Зокрема, у детонаційній трубі з внутрішнім діаметром 73 мм, що наповнена стехіометричною сумішшю пропан-бутана технічного з киснем, відбулось скорочення часу переходу горіння у детонацію з понад 1200 мкс до близько 200-300 мкс у разі зростання повної енергії іскрового розряду з 50 мДж до 13-14 Дж. При цьому, відстань переходу горіння у детонацію скоротилась з 299-413 мм до 185 мм.

Література

1. Шевенко М. С. Боротьба з російською бронетехнікою за допомогою протитанкових засобів ЗС України: допомога піхотинцю. Київ : Гром. орг. «Товариство правозахисту ветеранів правових структур», 2015. 67 с.
2. Сакун О.В., Історія та перспективи застосування танкових мінометів. *Механіка та машинобудування*, Харків, 2018. № 1. С. 89–96.
3. Merkava 4: веб-сайт. URL: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (дата звернення 05.09.2024).
4. Streetfighter and the future of the Challenger 2: веб-сайт. URL: <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (дата звернення 05.09.2024).
5. British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept: веб-сайт. URL: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operation/> (дата звернення 05.09.2024).
6. K. Korytchenko, C. Senderowski, D. Samoilenko, et al. Numerical analysis of the spark channel expansion in a high-pressure hydrogen–oxygen mixture and in nitrogen // *Shock Waves*, 2022, Vol. 32, pp. 321–335, <https://doi.org/10.1007/s00193-022-01077-3>
7. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Nikorchuk A., Tsebriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Applied physics*. 2018. 3/5 (93), P. 47–54.
8. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2019, Vol. 122(4), pp. 116–119, doi: 10.46813/2019-122-116
9. K. Korytchenko, Ye. Poklonskiy. Numerical simulation of gas-dynamic stage of spark discharge in oxygen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2013, Vol. (4), pp. 155–160.
10. Експериментальне дослідження процесу нагнітання стисненого газового заряду у газодетонаційному мінометі./ Б.Г. Любарський, С.Ю. Кривошеєв, О.В. Єресько, В.І. Галиця, І.В. Поляков, Д.Б. Любарський // *Механіка та машинобудування*. – 2024. – № 1. – С. 157–168.
11. Q. Wang, J. Xiang, G. Chen, Y. Cheng, X. Zhao, and S. Zhang, “Propylene Flow, Microstructure and Performance of WC–12Co Coatings Using a Gas–Fuel HVOF Spray Process,” *J. Mater. Process. Technol.* 213 (10), 1653–1660 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007>
12. H.D. Ng, J.H.S. Lee. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007; Vol. 32(1), pp. 93–99, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.03.012>
13. R. Zitoun, D. Desbordes, C. Gueraud, B. Deshaies. Direct initiation of detonation in cryogenic gaseous H₂-O₂ mixtures // *Shock Waves*, 1995, Vol. 4(6), pp. 331–337, <https://doi.org/10.1007/BF01413875>
14. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Essmann S., et al. Challenges of energy measurements of low-energy spark discharges / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 5-10 October 2020, pp.421-424. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172
15. V. Kamenskihs, H.D. Ng, J.H.S. Lee. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H₂-O₂ mixtures // *Combustion and Flame*, 2010, Vol. 157, pp. 1795–1799, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.014>
16. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen // *Jpn. J. Appl. Phys*, 2020, Vol. 59, SHHC04, <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab72cc>
17. K. Korytchenko, V. Markov, et al. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, Vol. 116(4), pp. 144–149.
18. K. Korytchenko, V. Golota, et al. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, Vol. 97(3), pp. 154–158.
19. D. Vinnikov, K. Korytchenko, A. Sakun. Numerical investigation of the formation of chemically active components in the spark discharge in water vapors // *Problems of Atomic*

Science and Technology, 2015, Vol. 98(4), pp. 220–223

20. K.V. Korytchenko, Y.V. Kashanskyi, O.V. Cherkashyn, et al. Comparison of spark channel expansion in hydrogen, oxygen and nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2020, Vol. 130(6), pp. 165–168, <https://doi.org/10.46813/2020-130-165>

References

1. Shevenko M. S. Borotjba z rosijskoju bronetehnikoju za dopomoghoju protytankovykh zasobiv ZS Ukrainy: dopomogha pikhotyncju. Kyjiv : Ghrom. orgh. «Tovarystvo pravozakhystu veteraniv pravovykh struktur», 2015. 67 s.
2. Sakun O.V., Istorija ta perspektyvy zastosuvannja tankovykh minometiv. *Mekhanika ta mashynobuduvannja*, Kharkiv, 2018. # 1. S. 89–96.
3. Merkava 4: веб-сайт. URL: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (data zvernennja 05.09.2024).
4. Streetfighter and the future of the Challenger 2: веб-сайт. URL: <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (data zvernennja 05.09.2024).
5. British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept: веб-сайт. URL: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operation/> (data zvernennja 05.09.2024).
6. K. Korytchenko, C. Senderowski, D. Samoilenko, et al. Numerical analysis of the spark channel expansion in a high-pressure hydrogen–oxygen mixture and in nitrogen // *Shock Waves*, 2022, Vol. 32, pp. 321–335, <https://doi.org/10.1007/s00193-022-01077-3>
7. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Nikorchuk A., Tseabriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Applied physics*. 2018. 3/5 (93), P. 47–54.
8. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2019, Vol. 122(4), pp. 116–119, doi: 10.46813/2019-122-116
9. K. Korytchenko, Ye. Poklonskiy. Numerical simulation of gas-dynamic stage of spark discharge in oxygen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2013, Vol. (4), pp. 155–160.
10. Eksperymentaljne doslidzhennja procesu naghnitannja stysnenogho ghazovogho zarjadu u ghazo-detonacijnomu minometri./ B.Gh. Ljubarskyj, S.Ju. Kryvoshejev, O.V. Jeresjko, V.I. Ghalycja, I.V. Poljakov, D.B. Ljubarskyj //

Mekhanika ta mashynobuduvannja. – 2024. – # 1. – S. 157–168.

11. Q. Wang, J. Xiang, G. Chen, Y. Cheng, X. Zhao, and S. Zhang, “Propylene Flow, Microstructure and Performance of WC–12Co Coatings Using a Gas–Fuel HVOF Spray Process,” *J. Mater. Process. Technol.* 213 (10), 1653–1660 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007>
12. H.D. Ng, J.H.S. Lee. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007; Vol. 32(1), pp. 93–99, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.03.012>
13. R. Zitoun, D. Desbordes, C. Gueraud, B. Deshaies. Direct initiation of detonation in cryogenic gaseous H₂-O₂ mixtures // *Shock Waves*, 1995, Vol. 4(6). pp. 331–337, <https://doi.org/10.1007/BF01413875>
14. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Essmann S., et al. Challenges of energy measurements of low-energy spark discharges / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 5-10 October 2020, pp.421-424. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172
15. V. Kamenskihs, H.D. Ng, J.H.S. Lee. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H₂-O₂ mixtures // *Combustion and Flame*, 2010, Vol. 157, pp. 1795–1799, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.014>
16. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen // *Jpn. J. Appl. Phys*, 2020, Vol. 59, SHHC04, <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab72cc>
17. K. Korytchenko, V. Markov, et al. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, Vol. 116(4), pp. 144–149.
18. K. Korytchenko, V. Golota, et al. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, Vol. 97(3), pp. 154–158.
19. D. Vinnikov, K. Korytchenko, A. Sakun. Numerical investigation of the formation of chemically active components in the spark discharge in water vapors // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, Vol. 98(4), pp. 220–223
20. K.V. Korytchenko, Y.V. Kashanskyi, O.V. Cherkashyn, et al. Comparison of spark channel expansion in hydrogen, oxygen and nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2020, Vol. 130(6), pp. 165–168, <https://doi.org/10.46813/2020-130-165>

Liubarskyi B.G., Kryvosheiev S.Y., Eresko O.V., Galitsa V.I., Sakun O.V., Liubarskyi D.B. Research on the influence of spark ignition energy on the detonation initiation process in a detonation tube

The paper examines the impact of spark ignition energy on the detonation initiation process in a detonation tube for a powderless mortar with controlled shot energy. It is shown that successful tests have demonstrated the ability of mortar prototypes to launch shells without the use of traditional powder charges, which confirms the effectiveness of the developed launch technology. The system is designed for automatic loading and provides the ability to fire with direct fire. Unlike conventional mortars, the proposed system uses a gas detonation charge to regulate the firing range. Therefore, the range of the shell is controlled not by changing the mortar elevation angle, but by changing the shot energy while maintaining a fixed elevation angle. Replacing the powder charge with a combustible gas mixture contributes to the integration of the mortar shot control system into broader fire control systems. This allows you to create a new semi-direct fire mode, which improves the tactical deployment of weapons in combat conditions. To transfer this technology to military production, further research and development of a specialized mortar control system are necessary. The key parameters for controlling the energy of a mortar shot are the initial pressure and volume of the compressed gas charge in the gas detonation chamber. The results of experimental studies revealed the influence of the spark ignition energy on the process of initiating detonation in the detonation tube. The study was conducted for 3 ranges of values of the total energy of the spark discharge, which were equal to 50 mJ, 0.84-1.54 J, 13-14 J. The spread in the values of the total energy of the discharge is associated with the deviation of the voltage of the spark gap breakdown. At each of the values, measurements were carried out no less than 3 times. It was established that an increase in the discharge energy leads to a reduction in the distance and time of the transition of combustion to detonation. In particular, in a detonation tube with an internal diameter of 73 mm, filled with a stoichiometric mixture of technical propane-butane with oxygen, the time for the transition from

combustion to detonation was reduced from over 1200 μ s to about 200-300 μ s in the event of an increase in the total energy of the spark discharge from 50 mJ to 13-14 J. At the same time, the distance from the transition from combustion to detonation was reduced from 299-413 mm to 185 mm.

Keywords: *spark ignition; detonation initiation; detonation tube; gas detonation charge*

Любарський Борис Григорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозбудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: lboris1911@ukr.net

Кривошеєв Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: Serhii.Kryvosheiev@khp.edu.ua

Єреско Олександр В'ячеславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: oleksandr.eresko@khp.edu.ua

Галиця Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної культури, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: vitaliy.galitsa@gmail.com

Сакун Олександр Валерійович – доктор технічних наук, завідувач кафедри військової підготовки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», E-mail: sakunav71@gmail.com

Любарський Дмитро Борисович – інженер кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: dizas005@ukr.net

Стаття подана 03.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-79-89>

УДК 629.424

ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ КУЛАЧКОВИХ ПРОФІЛІВ ДЛЯ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Фомін О.В., Логвіненко О.А., Сагін С.В., Луценко О.А., Заверкін А.В.

FEATURES OF SYNTHESIS OF OPTIMAL CAM PROFILES FOR GAS DISTRIBUTION MECHANISMS OF TRANSPORT VEHICLES

Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Sagin S.V., Lutsenko O.A., Zaverkin A.V.

У статті розглянуто особливості синтезу оптимальних кулачкових профілів для газорозподільних механізмів транспортних засобів, які відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності, надійності та екологічності енергетичних установок. Наголошено на актуальності проблеми вдосконалення конструкцій двигунів внутрішнього згорання в умовах зростаючих вимог до ресурсозбереження та зниження експлуатаційних витрат. Показано, що традиційні методи проектування кулачкових профілів не враховують у повному обсязі складні взаємозв'язки між кінематичними та динамічними характеристиками клапанного механізму, що призводить до підвищеного зносу, шумів, вібрацій і зниження паливної економічності.

Запропоновано нову методологію синтезу оптимальних кулачкових профілів, яка базується на використанні узагальнених математичних моделей і методів математичного планування експерименту. Це дозволяє формувати оптимальні параметри прискорень штовхача на різних ділянках його руху з урахуванням обмежень на радіус кривизни профілю, контактні напруження, коефіцієнт запасу клапанних пружин і умови забезпечення безрозривної динаміки механізму. Реалізація математичних планів другого порядку дала можливість побудувати номограми для визначення оптимальних параметрів, які забезпечують підвищення коефіцієнта повноти діаграми підйому штовхача та зниження динамічних навантажень.

Отримані результати доводять, що оптимізація кулачкових профілів сприяє зменшенню навантажень на елементи газорозподільного механізму, підвищенню ресурсу його роботи та надійності, а також покращенню процесів газообміну в циліндрах двигуна. Це забезпечує

зростання потужності, паливної економічності та екологічних характеристик транспортних енергетичних установок. Розроблений підхід має практичне значення як для створення нових двигунів, так і для модернізації існуючих конструкцій, відповідаючи сучасним тенденціям розвитку транспортних технологій.

Результати дослідження відкривають перспективи подальшої автоматизації проектування газорозподільних механізмів та інтеграції комп'ютерного моделювання в інженерну практику. Це дозволяє створювати інноваційні рішення у сфері двигунобудування, спрямовані на досягнення високих показників ефективності та довговічності транспортних систем.

Ключові слова: транспорт, енергетичні установки, транспортні технології, ресурсозбереження, експлуатація, автоматизація, комп'ютерне моделювання, математичне планування.

Вступ. Сучасна транспортна промисловість постійно шукає шляхи для підвищення ефективності та екологічності транспортних засобів. Серед них найбільш поширеними є двигуни внутрішнього згорання, які працюють у дедалі жорсткіших умовах, що вимагає постійного вдосконалення їх компонентів. Ключовим вузлом зазначених двигунів є газорозподільний механізм (ГРМ), який значною мірою визначає їх ефективність, потужність, економічність та екологічні показники.

Постановка проблеми. Існуючі методи проектування кулачкових механізмів

газорозподілу, зокрема профілів кулачків, як правило, не дозволяють повною мірою врахувати складний взаємозв'язок між кінематичними та динамічними характеристиками ГРМ, а також їх вплив на загальні характеристики двигуна. Це призводить до компромісних рішень, які не забезпечують досягнення оптимальних показників. Відсутність універсальних та ефективних методик синтезу кулачкових профілів, що враховують динаміку клапанного механізму та його взаємодію з потоками газів, є серйозною проблемою. Неоптимальні кулачкові профілі можуть спричинити підвищений знос, шуми та вібрації, а також знижувати паливну ефективність та збільшувати викиди шкідливих речовин. Це особливо відчутно в умовах зростаючих екологічних вимог та потреби у зниженні експлуатаційних витрат. Таким чином, виникає нагальна потреба в розробці та впровадженні нових, більш досконалих методів синтезу оптимальних кулачкових профілів, які дозволять покращити характеристики двигунів та відповідати сучасним викликам транспортної промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В рамках вище зазначеного, авторами було проведено аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики. Так в статті [1] автори запропонували універсальний метод проектування кулачкового профілю на основі кубічних сплайнів і динамічного моделювання. Методика дозволяє враховувати нелінійні кінематичні та динамічні характеристики системи. Запропоновані підходи дають змогу досягти плавності руху та зниження динамічних навантажень.

В статті [2] дослідниками виконано типологічний синтез механізмів змінного ступеня стиснення двигунів. Автори розглянули декілька типів конструкцій механізмів, зокрема кулісні, важільні та ексцентрикові. Проведено кінематичний і геометричний аналіз можливих конфігурацій. Особлива увага приділена ефективності, компактності та реалістичності вбудови їх у двигуни.

В роботі [3] авторами розроблено метод оптимального кінематичного синтезу профілю кулачка для клапанного механізму двигуна. Його основу складало чисельне моделювання з урахуванням швидкості, прискорення та ривку. Результати показали поліпшення плавності ходу клапанів і зменшення вібрацій.

В статті [4] досліджено параметри ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого

складу. Теоретична частина включає моделі з урахуванням електричних та масогабаритних характеристик. Запропоновані параметри дозволяють збільшити автономність систем живлення.

В дослідженні [5] проаналізовано існуючі та перспективні профілі елементів несучих систем рухомого складу. Розглянуто вплив геометрії профілів на міцність і стійкість вагонних конструкцій. Особлива увага приділена можливостям зниження ваги без втрати міцності. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності залізничного транспорту.

В роботі [6] наведено метод оптимального синтезу пружинного кулачкового механізму із застосуванням кубічних сплайнів. Розроблена авторами математична модель дозволяє коректно врахувати вплив пружини на кінематику. Результати мають практичну цінність для швидкісних механізмів.

В статті [7] визначено раціональні параметри ємнісної системи накопичення енергії для метрополітену. Було враховано характеристики зарядно-розрядного циклу та умови експлуатації. Розроблена математична модель дозволяє оптимізувати роботу акумуляторної системи. Автори запропонували інженерні рішення для покращення енергозбереження.

В роботі [8] наведено особливості розрахунків на міцність основних деталей механізму газорозподілу сучасних локомотивних енергетичних установок. В дослідженні наведені відповідні розробки для проведення розрахунків на міцність найважливіших деталей механізму газорозподілу з урахуванням проявів динаміки.

В дослідженні [9] розглянуто вплив параметрів електропередачі на ефективність вантажного електротранспорту постійного струму. Авторами було запропоновано методику розрахунку та вибору параметрів передавального комплексу. Моделювання показало потенціал підвищення коефіцієнту корисної дії системи.

В роботі [10] авторами досліджено вплив високих порядків кінематичних параметрів на динаміку швидкісних кулачкових профілів. Запропоновано метод оптимізації з урахуванням прискорення, ривку та вищих похідних. Дослідження має високу практичну цінність для високошвидкісних двигунів.

В статті [11] запропоновано математичну модель термічної правки металоконструкцій

вантажних вагонів, яка дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу при термічному впливі. Результати можна використовувати для обґрунтування технологій ремонту. Стаття є корисною для підвищення довговічності вагонів.

В статті [12] авторами було проаналізовано синтез механізмів змінного стиснення двигунів, з акцентом на типологію. Також розглянуто переваги різних конструкцій за параметрами розміру, міцності та простоти реалізації. Автори запропонували систему класифікації для проектування нових схем. Застосовано комп'ютерне моделювання для аналізу кінематики. Робота важлива для модернізації двигунів внутрішнього згоряння.

Авторами в роботі [13] було розроблено конструкцію гідравлічного механізму регулювання відкриття клапанів з кулачковим приводом. Основною метою дослідження було покращення ефективності двигуна за рахунок змінної геометрії. Автори виконали аналіз руху та перевірили модель експериментально. Дослідження показало перспективність гідравлічного приводу для адаптивного керування клапанами. Це дозволяє значно знизити витрату пального.

В дослідженні [14] авторами побудовано математичні моделі зміни параметрів несучих елементів піввагонів, які дають змогу прогнозувати залишковий ресурс конструкції. Запропоновано шляхи посилення і подовження строку служби. Робота є базою для удосконалення технічного обслуговування.

В статті [15] авторами виконано термодинамічне моделювання та проведено оптимізацію клапанного механізму з дзеркальним розташуванням. У роботі використано комбінований підхід: тепловий розрахунок і кінематичний аналіз. Результати вказують на зростання коефіцієнту корисної дії при оптимальній геометрії.

Автори статті [16] розробили метод оптимального проектування профілю кулачка для дизельних двигунів великої потужності. Досліджено динаміку клапанного механізму з акцентом на вібрації та навантаження. Проведено моделювання реальних умов роботи. Оптимізація профілю забезпечує підвищену надійність і тривалість служби. Робота підкреслює важливість адаптації кулачків до робочих умов.

Аналіз літератури засвідчив, що питанням визначення особливостей синтезу оптимальних кулачкових профілів для газорозподільних

механізмів транспортних засобів не приділено достатньої уваги. Попри численні дослідження у сфері двигунобудування, комплексний підхід до оптимізації кулачкових профілів, що враховує динамічні характеристики системи та вимоги до паливної ефективності та екологічності, залишається недостатньо висвітленим. Існуючі роботи часто зосереджені на окремих аспектах, таких як кінематика або динаміка, без системного інтегрування всіх взаємопов'язаних факторів. Це створює прогалину в науковому розумінні та практичному застосуванні передових методів проектування. Отже необхідність подальших досліджень для розробки універсальних та ефективних методик синтезу є очевидною.

Метою статті є розробка та обґрунтування методології синтезу оптимальних кулачкових профілів для газорозподільних механізмів транспортних засобів, яка забезпечить підвищення ефективності, надійності та екологічності двигунів внутрішнього згоряння. Тобто авторами ставиться за мету розробка інструменту, який дозволить інженерам проектувати високоефективні кулачки, що максимально відповідають експлуатаційним вимогам.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис.1 наведено базовий безударний закон зміни прискорень роликів штовхача кулачкового механізму приводу клапанів (КМПК) представлений у вигляді модифікованої трапеції.

До основних параметрів даного закону відносяться:

\ddot{x}_1 – аналог додатних прискорень штовхача в кінці ділянки I, обирається з умов обмеження за мінімальним радіусом кривизни ввігнутої ділянки конструктивного профілю кулачка;

m_1, m_2 – коефіцієнти збільшення додатних прискорень відповідно на ділянках II і III, призначаються за умов виконання обмеження за мінімальним радіусом кривизни ввігнутої ділянки профілю і контролю контактних напружень;

\ddot{x}_2 – аналог від'ємних прискорень штовхача в кінці ділянки IV, контролюється за умов забезпечення потрібного запасу клапанних пружин за силами інерції;

k_1, k_2 – коефіцієнти збільшення від'ємних прискорень відповідно на ділянках V і VI, остаточно призначаються за умов забезпечення безрозривної динаміки ГРМ при контролі запасу пружин за силами інерції;

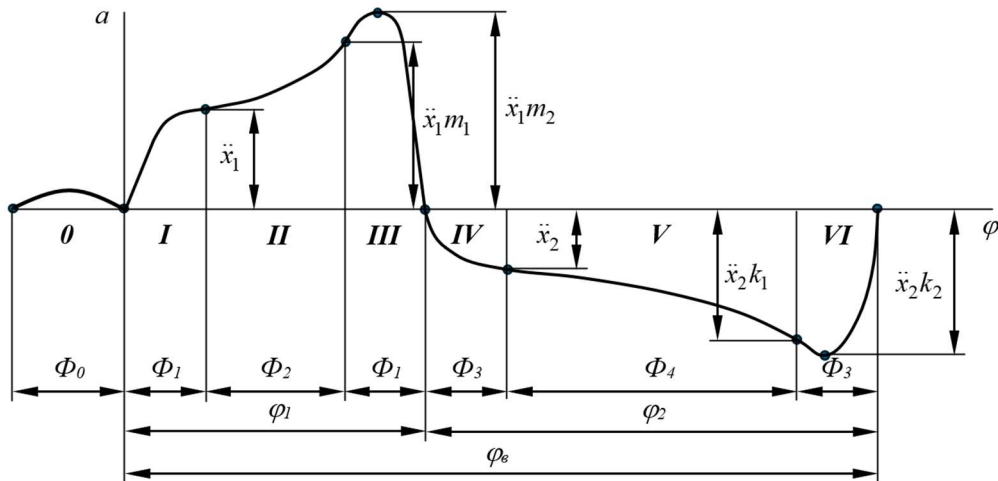


Рис. 1. Базовий закон зміни прискорень штовхача

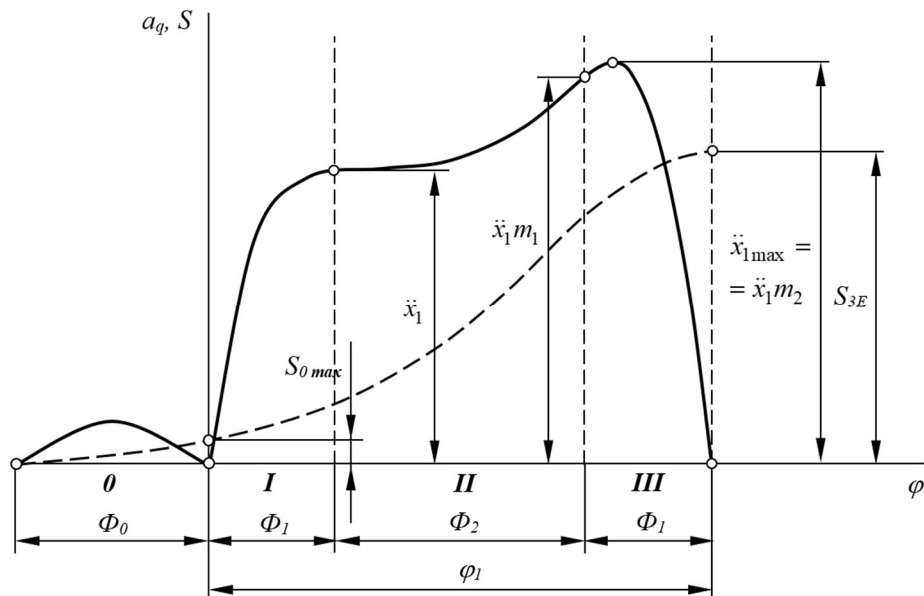


Рис. 2. Ділянка додатних прискорень

Φ_0 – довжина ділянки компенсації теплового зазору;

Φ_1, \dots, Φ_4 – довжини ділянок базового закону прискорень штовхача;

φ_1, φ_2 – довжини ділянок додатних і від’ємних прискорень штовхача;

$\varphi_6 = \varphi_1 + \varphi_2$ – фазовий кут віддалення.

Так до комплексу умов на проектування кулачкових механізмів з роликowymi штовхачами, що рухаються поступально (саме для ділянки додатних прискорень (див. рис. 2)) відносяться: припустимий радіус кривизни $[R_{кр}]$ увігнутої ділянки робочого профілю, який обирається за умов можливостей металоріжучого обладнання (умова

проектування $R_{кр \min} \geq [R_{кр}]$); максимальний припустимий кут тиску $[\beta]$ (умова проектування $\beta_{\max} \leq [\beta]$); $[\varphi_1]$ – мінімальне припустиме значення кута обертання кулачка, що відповідає довжині ділянки додатних прискорень штовхача (умова проектування $\varphi_1 \geq [\varphi_1]$); $[\ddot{x}_{1\max}]$ – максимальний припустимий рівень аналога додатних прискорень штовхача, який задається за умов контролю рівня контактних напружень і радіусів кривизни увігнутої ділянки робочого профілю (умова проектування $\ddot{x}_{1\max} \leq [\ddot{x}_{1\max}]$); S_{3E} – переміщення штовхача в кінці ділянки додатних прискорень (умова проектування $S_{3E} = S_{3E\max}$).

Для зменшення кількості варійованих параметрів базового закону на ділянці додатних прискорень доцільно задати постійні значення для ряду параметрів, а саме: довжину ділянки I Φ_1 та співвідношення величин коефіцієнтів m_1 і m_2

($m_2 = a \cdot m_1$). При цьому величину аналога прискорень \ddot{x}_1 необхідно приймати рівним найменшому значенню аналогів прискорень з розрахунків для дугового ввігнутого кулачка з радіусом кривизни ввігнутої ділянки $R_{кр} = [R_{кр}]$. Таким чином до змінних параметрів базового закону на ділянці додатних прискорень відносяться коефіцієнт збільшення прискорень на ділянці II m_1 та її довжина Φ_2 .

Розглядаючи вибір основних параметрів базового закону як задачу оптимізаційного проектування КМПК в якості проміжного критерію оптимальності прийнятого рішення (з вибору величин m_1 та Φ_2) обирається величина переміщення штовхача в кінці ділянки III – S_{3E} .

При цьому межі варіювання параметричних обмежень (m_1, Φ_2) формують зону можливих рішень, в якій розглядається зона допустимих рішень D_x , що відповідає функціональним обмеженням $\beta_{max} \leq [\beta]$ і $R_{кр min} \geq [R_{кр}]$

$$D_x = \left\{ m_1, \Phi_2 \mid \beta_{max} \leq [\beta], R_{кр min} \geq [R_{кр}], m_{1a} \leq m_1 \leq m_{1b}, \Phi_{2a} \leq \Phi_2 \leq \Phi_{2b} \right\}.$$

Тоді цільова функція (ЦФ) дослідження з вибору оптимальних параметрів додатної ділянки базового закону має вид

$$S_{3E}(m_1, \Phi_2) \Rightarrow \max, \quad m_1, \Phi_2 \in D_x.$$

На етапі виконання проектувальних робіт вибір оптимальних значень параметрів m_1 і Φ_2 виконується за рахунок аналізу узагальнених математичних моделей (УММ) контролюємих показників, що отримуються за допомогою методів математичного планування експерименту.

Відповідно до рекомендацій будується ортогональний математичний план другого порядку, в якому змінними, що варіюються є m_1 і Φ_2 , а в якості вихідних показників виступають величини S_{3E} , $R_{кр min}$ та β_{max} .

Реалізація математичного плану дасть можливість отримати УММ виду

$$S_{3E} = f(m_1, \Phi_2),$$

$$R_{кр min} = f(m_1, \Phi_2),$$

$$\beta_{max} = f(m_1, \Phi_2).$$

Остаточні значення параметрів m_1 і Φ_2 обираються з аналізу допоміжної номограми, яка будується за допомогою отриманих УММ, на якій в координатах m_1 і Φ_2 будуються декілька ізоліній фіксованих значень показника S_{3E} і обмежувальних ізолінії $\beta_{max} = [\beta]$ і $R_{кр min} = [R_{кр}]$. Таким чином в результаті виконаного дослідження визначаються значення основних параметрів базового закону додатних прискорень: Φ_1 , \ddot{x}_1 , m_1 , m_2 .

У відповідності з наведеними вище рекомендаціями, щодо визначення параметрів базового закону на ділянці додатних прискорень штовхача, в якості прикладу, з використанням матриці планування (графічна інтерпретація якої наведена на рис. 3), було побудовано ортогональний математичний план другого порядку для двох змінних, які варіюються на трьох рівнях (табл. 1).

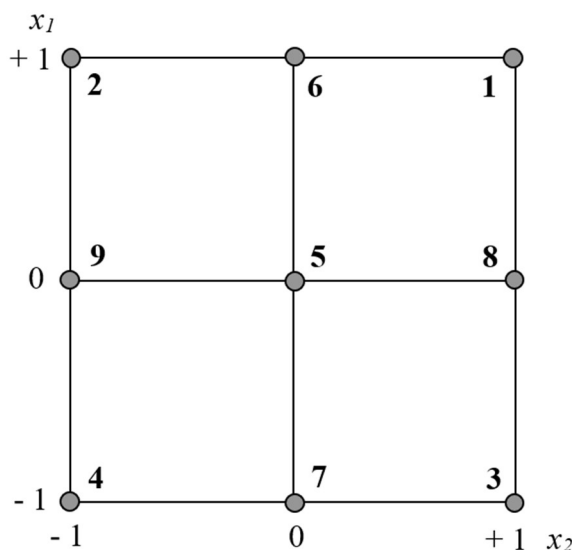


Рис. 3. Графічна інтерпретація матриці планування

У якості змінних, що варіюються, до плану входять величини m_1 і Φ_2 , а в якості вихідних параметрів - відповідні значення S_{3E} , $R_{кр min}$ і β_{max} . Межі варіювання вхідних змінних плану, вибрані у відповідності з обмеженнями, що накладаються і в даному випадку складають: $m_1 = 1, 1, \dots, 1, 7$;

Таблиця 1

Математичний план дослідження на ділянці додатних прискорень базового закону

№	Матриця планування		$\Phi_2, \text{град}$	m_1	$R_{кр \text{ min}}, \text{мм}$	$\beta_{\text{max}}, \text{град}$	$S_{3E}, \text{мм}$
	x_1	x_2					
1	1	1	13	1,7	-163,541	33,682	11,598
2	1	-1	13	1,1	-178,576	29,874	10,898
3	-1	1	9	1,7	-113,994	30,062	8,408
4	-1	-1	9	1,1	-178,576	26,369	7,891
5	0	0	11	1,4	-178,576	30,130	9,631
6	1	0	13	1,4	-178,576	31,825	11,248
7	-1	0	9	1,4	-162,141	28,254	8,150
8	0	1	11	1,7	-134,172	31,968	9,933
9	0	-1	11	1,1	-178,576	28,205	9,329

$\Phi_2 = 9...13^\circ$. При цьому фіксуються такі параметри базового закону прискорень: $\ddot{x}_1 = 107,03 \text{ мм/рад}^2$, $\Phi_1 = 5^\circ$, $m_2 = a \cdot m_1$ де $a = 1,02$.

Реалізація математичного плану (табл. 1) дозволила отримати шукані УММ у вигляді поліномів другого ступеня

$$S_{3E} = 9,631 + 1,549 \cdot x_1 + 0,303 \cdot x_2 + 0,067 \cdot x_1^2 - 0,001 \cdot x_2^2 + 0,045 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (1)$$

$$R_{кр \text{ min}} = -173,903 - 10,997 \cdot x_1 + 20,67 \cdot x_2 + 1,207 \cdot x_1^2 + 15,191 \cdot x_2^2 - 12,387 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (2)$$

$$\beta_{\text{max}} = 30,129 + 1,782 \cdot x_1 + 1,877 \cdot x_2 - 0,091 \cdot x_1^2 - 0,043 \cdot x_2^2 + 0,028 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (3)$$

де x_1, x_2 - нормовані параметри змінних Φ_2, m_1 .

Перевірка відповідності розрахованих за залежностями (1-3) значень для опорних режимів плану підтвердила адекватність складених УММ, яка визначається наведеними значеннями середньоквадратичних відхилень $\sigma_{S_{3E}} = \pm 0,003$, $\sigma_{R_{кр \text{ min}}} = \pm 5,143$, $\sigma_{\beta_{\text{max}}} = \pm 0,0058$.

Отримані УММ дозволили за допомогою простих розрахунків одержати допоміжну номограму (див. рис. 4), на якій нанесені ізолінії проміжного критеріального показника S_{3E} і обмежувальні ізолінії $R_{кр \text{ min}} = -170 \text{ мм}$ та $\beta_{\text{max}} = 30^\circ$. Її аналіз дозволяє обирати

оптимальні значення коефіцієнту m_1^* та довжини Φ_2^* .

Основними параметрами базового закону на ділянці від'ємних прискорень (рис. 5) є його довжина за кутом обертання кулачка φ_2 , довжина Φ_3 ділянок IV і VI, від'ємне прискорення \ddot{x}_2 на кінці ділянки IV, коефіцієнти збільшення від'ємних прискорень k_1 і k_2 на ділянках V і VI.

При цьому основними умовами на проектування, що ураховуються є: коефіцієнт повноти діаграми підйомів штовхача η_n (умова проектування $\eta_n = \eta_{n \text{ max}}$); коефіцієнт запасу клапанних пружин k_{3n} за силами інерції (умова проектування $k_{3n} \geq 1,5$).

При формуванні параметрів базової кривої від'ємних прискорень задаємося фіксованими значеннями кута Φ_3 і співвідношенням коефіцієнтів k_1 і k_2 ($k_2 = b \cdot k_1$). Умови ж забезпечення коефіцієнту запасу клапанних пружин за силами інерції тоді доцільно ураховувати через рівні прискорень \ddot{x}_2 і $\ddot{x}_{2 \text{ max}}$, тобто через коефіцієнт k_1 .

На рис. 5 пунктиром проведена наближена крива від'ємних прискорень, визначена характеристикою клапанних пружин $a_{q(np)} = f(\varphi)$. Тоді в будь-якій точці поточне значення коефіцієнту запасу визначається з формули $k_{3n} = \frac{a_{q(np)}}{a_q}$. При цьому наближено

найбільший припустимий рівень аналогу від'ємних прискорень $[\ddot{x}_{2 \text{ max}}] = \frac{a_{q(np) \text{ max}}}{k_{3n \text{ min}}}$.

Припустимий же рівень аналогів прискорень в

кінці ділянки IV: $[\ddot{x}_2] = \frac{a_{q(np)IV}}{k_{zn\ min}}$, де $a_{q(np)IV}$ – аналог від'ємних прискорень, обумовлений в кінці ділянки IV характеристикою клапанних пружин.

Вибір оптимальних значень коефіцієнту k_1 при заданому діапазоні зміни величини Φ_2 виконується також на основі аналізу УММ, які

отримуються за допомогою методів математичного планування експерименту.

Відповідно до рекомендацій будується ортогональний план другого порядку, до якого в якості змінних параметрів входять величини k_1 і φ_1 , а вихідними показниками є значення коефіцієнту η_n і рівнів аналогів від'ємних прискорень \ddot{x}_2 і $\ddot{x}_{2\max}$.

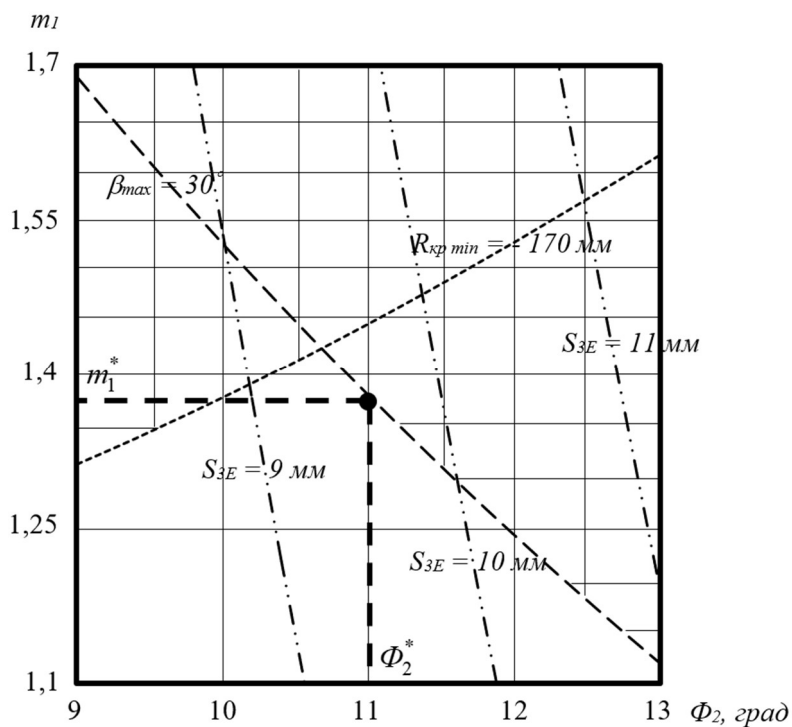


Рис. 4. Допоміжна номограма до визначення основних параметрів базового закону на ділянці додатних прискорень

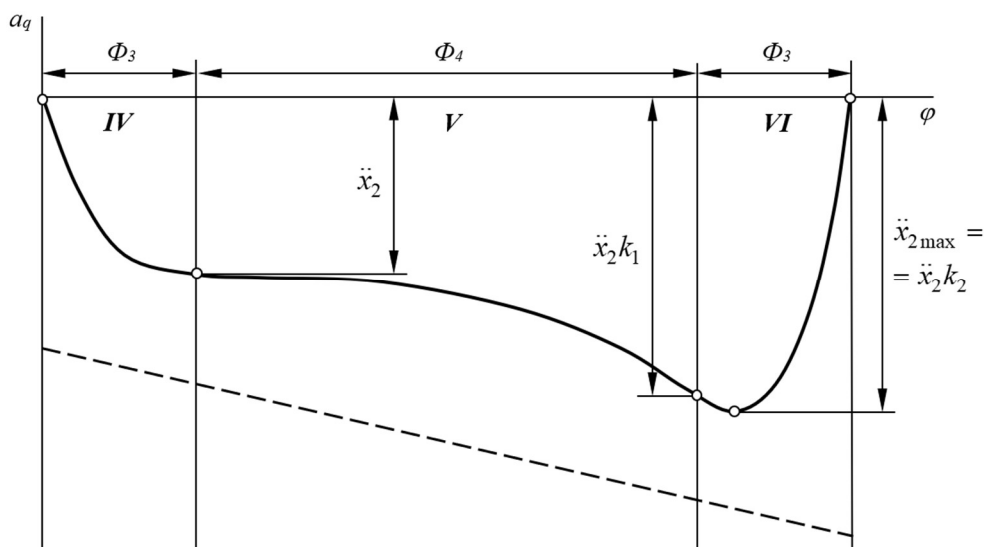


Рис. 5. Ділянка від'ємних прискорень

Реалізація математичного плану забезпечує отримання бажаних поліноміальних УММ виду $\eta_n = f(k_1, \varphi_1)$; $\ddot{x}_2 = f(k_1, \varphi_1)$; $\ddot{x}_{2max} = f(k_1, \varphi_1)$.

При цьому межі варіювання параметричних обмежень (k_1, φ_1) формують зону можливих рішень, в якій розглядають зону допустимих рішень D_x , яка відповідає функціональним обмеженням $\ddot{x}_2 \leq [\ddot{x}_2]$ і $\ddot{x}_{2max} \leq [\ddot{x}_{2max}]$

$$D_x = \left\{ k_1, \varphi_1 \mid \ddot{x}_2 \leq [\ddot{x}_2], \ddot{x}_{2max} \leq [\ddot{x}_{2max}], k_{1a} \leq k_1 \leq k_{1b}, \varphi_{1a} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1b} \right\}$$

Тоді ЦФ дослідження з вибору оптимальних параметрів від'ємної ділянки базового закону має вид

$$\eta_n(k_1, \varphi_1) \Rightarrow \max, \quad k_1, \varphi_1 \in D_x \in D.$$

Отримані УММ дають змогу побудувати допоміжну номограму, на якій спільно наносяться декілька ізоліній фіксованих значень показника ефективності КМПК η_n , а також обмежувальні ізолінії $\ddot{x}_2 = [\ddot{x}_2]$ і $\ddot{x}_{2max} = [\ddot{x}_{2max}]$. Саме на підставі аналізу такої допоміжної номограми відшукуються значення параметрів k_1 і φ_1 .

У відповідності з наведеними вище рекомендаціями, щодо визначення параметрів базового закону на ділянці від'ємних прискорень штовхача, в якості прикладу, з використанням матриці планування (графічна інтерпретація якої наведена на рис. 3), було побудовано ортогональний математичний план другого порядку для двох змінних, які варіюються на трьох рівнях (табл. 2).

У якості змінних, що варіюються входять величини k_1 і φ_1 , а у якості вихідних параметрів

– відповідні значення $\eta_n, \ddot{x}_2, \ddot{x}_{2max}$. При цьому було встановлено наступні межі варіювання вхідних змінних $k_1 = 1,5 \dots 1,9$, $\varphi_1 = 20 \dots 22$, а фіксованими параметрами базового закону є $\Phi_3 = 5^\circ$, $k_2 = b \cdot k_1$ де $b = 1,02$.

Реалізація математичного плану дозволила скласти шукані УММ

$$\eta_n = 0,665 + 0,005 \cdot x_1 - 0,001 \cdot x_1^2 - 0,001 \cdot x_2^2 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2, \tag{4}$$

$$\ddot{x}_2 = -84,087 - 14,11 \cdot x_1 + 2,477 \cdot x_2 - 1,355 \cdot x_1^2 - 0,01 \cdot x_2^2 + 0,491 \cdot x_1 \cdot x_2, \tag{5}$$

$$\ddot{x}_{2max} = -145,815 - 24,399 \cdot x_1 - 13,045 \cdot x_2 - 2,339 \cdot x_1^2 + 0,491 \cdot x_2^2 - 2,026 \cdot x_1 \cdot x_2, \tag{6}$$

де x_1, x_2 – нормовані параметри змінних k_1 і φ_1 .

Перевірка відповідності розрахованих за залежностями (4-6) значень для відповідних опорних режимів плану підтвердила адекватність складених УММ, про що свідчать значення відповідних середньоквадратичних відхилень

$$\sigma_{\eta_n} = \pm 0,0034, \quad \sigma_{\ddot{x}_2} = \pm 0,0411, \quad \sigma_{\ddot{x}_{2max}} = \pm 0,1287.$$

Отримані УММ дозволили за допомогою простих розрахунків одержати допоміжну номограму (див. рис. 6), на якій нанесені ізолінії показника η_n і обмежувальні ізолінії показників $\ddot{x}_2 = -90 \text{ мм/рад}^2$ та $\ddot{x}_{2max} = -150 \text{ мм/рад}^2$. Її аналіз дозволяє обирати оптимальні значення коефіцієнту k_1^* та довжини φ_1^* .

Таблиця 2

Математичний план дослідження на ділянці від'ємних прискорень базового закону

№	Матриця планування		φ_1 , град	k_1	η_n	\ddot{x}_2 , мм/рад ²	\ddot{x}_{2max} , мм/рад ²
	x_1	x_2					
1	1	1	22	1,9	0,671	-96,571	-187,15
2	1	-1	22	1,5	0,670	-102,550	-156,90
3	-1	1	20	1,9	0,661	-69,334	-134,37
4	-1	-1	20	1,5	0,659	-73,347	-112,22
5	0	0	21	1,7	0,666	-84,087	-145,81
6	1	0	22	1,7	0,671	-99,548	-172,62
7	-1	0	20	1,7	0,660	-71,334	-123,69
8	0	1	21	1,9	0,666	-81,660	-158,26
9	0	-1	21	1,5	0,665	-86,533	-132,39

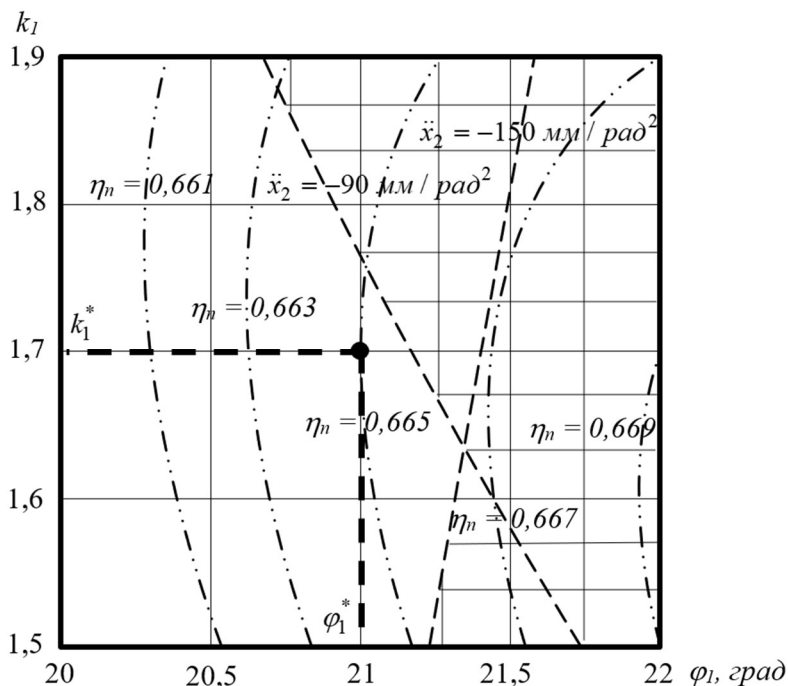


Рис. 6. Допоміжна номограма до визначення основних параметрів базового закону на ділянці від'ємних прискорень

Отже сумісний аналіз допоміжних номограм надає змогу сформувавши масив основних параметрів базового закону прискорень штовхача, при яких досягається максимальне значення коефіцієнту повноти діаграми підйому штовхача ($\eta_{n\max}$), а також виконуються вимоги та обмеження на проектування і забезпечується прийнятна динаміка клапанних приводів.

Висновки. Розроблена в статті методологія синтезу оптимальних кулачкових профілів є ефективним інструментом для покращення експлуатаційних характеристик двигунів внутрішнього згорання. Вона дозволяє знайти баланс між кінематичними та динамічними параметрами ГРМ, що призводить до зниження шумів та вібрацій. Застосування запропонованих оптимальних кулачкових профілів дозволяє суттєво зменшити динамічні навантаження на елементи ГРМ, що оказує прямий вплив на збільшення його ресурсу та надійності. В той же час оптимізовані профілі кулачків сприяють покращенню процесів газообміну в циліндрах двигуна, що, в свою чергу, підвищує його потужність та паливну економічність, а також призводить до поліпшення екологічних показників.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні нових двигунів, а також при модернізації існуючих, забезпечуючи їх відповідність сучасним вимогам. Отримані

наукові результати відкривають нові напрямки для подальших досліджень у сфері оптимізації роботи складних механічних систем, зокрема, у двигунобудуванні.

Література

- Jiang Z., Zhu T., Chen Z., Fan R., Gao Y., Zhang H., Wang L. A general design method of cam profile based on cubic splines and dynamic model: case study of a gravity-driven tricycle. *Mathematics*. 2022. 10(12). 1979. <https://doi.org/10.3390/math10121979>
- Mo Y.K., Shim J.K., Kwak S.W., Jo M.S., Park H.S. Type synthesis of variable compression ratio engine mechanisms. *Applied Sciences*. 2020. 10(18), 6574. <https://doi.org/10.3390/app10186574>
- Qin W., Chen Y. Study on optimal kinematic synthesis of cam profiles for engine valve trains. *Applied Mathematical Modelling*. 2014. Vol. 38. Issue 17–18. 4345–4353. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.02.015>
- Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A.G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5(1), P. 79–87. doi:10.29202/nvngu/2018-5/8
- Фомін О.В., Логвіненко О.А., Бурлуцький О.В., Фоміна А.М. Аналіз існуючих та перспективних профілів складових елементів несучих систем одиниць рухомого складу залізниць. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. 2016. №

- 46(1218). С. 66-72. DOI: 10.20998/2078-9130.2016.46.88052
6. Kim J.H., Ahn K.Y., Kim S.H. Optimal synthesis of a spring-actuated cam mechanism using a cubic spline. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2002. 216(9). 875-883. <https://doi.org/10.1177/095440620221600902>
 7. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2. No. 1 (92). P. 63-71. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/126080>
 8. Logvinenko A.A. Peculiarities of stress calculation of basic parts of valve timing gear of modern locomotive electric power installations. *Metallurgical and mining industry (Machine building)*. 2014. No.6. P. 52-56. <https://www.metaljournal.com.ua/MMI-2014-No6/>
 9. Gorobchenko O., Fomin O., Fomin V., Kovalenko V. Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 1. No. 3 (91). P. 60-67. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/121713>
 10. Yu J., Huang K., Luo H., Wu Y., Long X. Manipulate optimal high-order motion parameters to construct high-speed cam curve with optimized dynamic performance. *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 371. 124953. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.124953>
 11. Фомін О.В., Горбунов М.І., Бурлуцький О.В., Логвіненко О.А., Фоміна А.М. Математичне описання термічної правки вагонних металоконструкцій. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського: Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29(68). № 1. Частина 3. С.151-155. http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/eng/journals/2018/1_2018/part_3/28.pdf
 12. Mo Y.K., Shim J.K., Kwak S.W., Jo M.S., Park H.S. Type synthesis of variable compression ratio engine mechanisms. *Applied Sciences*. 2020. 10(18). 6574. <https://doi.org/10.3390/app10186574>
 13. Xie F., Zhong B., Yang G., Zhao P., Hong W., Su Y. Design and motion characteristics of cam driven hydraulic variable valve mechanism. *Automotive Engineering*. 2020. Vol. 42. Issue 3. 307-314. <https://doi.org/10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.03.005>
 14. Фомін О.В., Логвіненко О.А., Дьомін Р.Ю., Бородай Г.П., Фомін В.В., Бурлуцький О.В. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів. *Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України»*. 2013. № 5/6(102/103). С. 95-104.
 15. Sun S.Y., Wang D.S., Zhou Q.Z. Thermodynamic simulation and optimum design of valve train for cam engine with the counter position placement. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 66-68. 1234-1239. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.66-68.1234>
 16. Sun L.W., Su T.X., Xu J.F., Wang Q., Xu C.L., You G.D. Dynamics analysis and cam profile optimal design of the valve train in the diesel engine with high specific power. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 308-310. 1636-1640. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.308-310.1636>

References

1. Jiang Z., Zhu T., Chen Z., Fan R., Gao Y., Zhang H., Wang L. A general design method of cam profile based on cubic splines and dynamic model: case study of a gravity-driven tricycle. *Mathematics*. 2022. 10(12). 1979. <https://doi.org/10.3390/math10121979>
2. Mo Y.K., Shim J.K., Kwak S.W., Jo M.S., Park H.S. Type synthesis of variable compression ratio engine mechanisms. *Applied Sciences*. 2020. 10(18), 6574. <https://doi.org/10.3390/app10186574>
3. Qin W., Chen Y. Study on optimal kinematic synthesis of cam profiles for engine valve trains. *Applied Mathematical Modelling*. 2014. Vol. 38. Issue 17-18. 4345-4353. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.02.015>
4. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A.G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5(1), P. 79-87. doi:10.29202/nvngu/2018-5/8
5. Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Burlutskiy O.V., Fomina A.M. Analiz isnujuchykh ta perspektyvnykh profiliv skladovykh elementiv nesuchykh system odyncyj rukhomogho skladu zaliznycj. *Visnyk Nacionalnijnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI»*. Serija: *Dynamika ta micnistj mashyn*. 2016. № 46(1218). С. 66-72. DOI: 10.20998/2078-9130.2016.46.88052
6. Kim J.H., Ahn K.Y., Kim S.H. Optimal synthesis of a spring-actuated cam mechanism using a cubic spline. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2002. 216(9). 875-883. <https://doi.org/10.1177/095440620221600902>
7. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2. No. 1 (92). P. 63-71. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/126080>
8. Logvinenko A.A. Peculiarities of stress calculation of basic parts of valve timing gear of modern

- locomotive electric power installations. *Metallurgical and mining industry (Machine building)*. 2014. No.6. P. 52-56. <https://www.metaljournal.com.ua/MMI-2014-No6/>
9. Gorobchenko O., Fomin O., Fomin V., Kovalenko V. Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 1. No. 3 (91). P. 60-67. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/121713>
 10. Yu J., Huang K., Luo H., Wu Y., Long X. Manipulate optimal high-order motion parameters to construct high-speed cam curve with optimized dynamic performance. *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 371. 124953. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.124953>
 11. Fomin O.V., Gorbunov M.I., Burlutskiy O.V., Lohvinenko O.A., Fomina A.M. Matematychni opysannja termichnoji pravky vaghonykh metalokonstrukcij. *Vcheni zapysky Tavrijskogo nacionaljnogho univertsytetu imeni V.I. Vernadskogho: Serija: Tekhnichni nauky*. 2018. Tom 29(68). № 1. Chastyna 3. S. 151-155. http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/eng/journals/2018/1_2018/part_3/28.pdf
 12. Mo Y.K., Shim J.K., Kwak S.W., Jo M.S., Park H.S. Type synthesis of variable compression ratio engine mechanisms. *Applied Sciences*. 2020. 10(18). 6574. <https://doi.org/10.3390/app10186574>
 13. Xie F., Zhong B., Yang G., Zhao P., Hong W., Su Y. Design and motion characteristics of cam driven hydraulic variable valve mechanism. *Automotive Engineering*. 2020. Vol. 42. Issue 3. 307-314. <https://doi.org/10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.03.005>
 14. Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Djomin R.Ju., Borodaj Gh.P., Fomin V.V., Burlutskiy O.V. Matematychni modeli zminy osnovnykh pokaznykiv bazovykh nesuchykh elementiv kuzoviv napivvaghoniv. *Naukovo-praktychnyj zhurnal «Zaliznychnyj transport Ukrainy»*. 2013. № 5/6(102/103). S. 95-104.
 15. Sun S.Y., Wang D.S., Zhou Q.Z. Thermodynamic simulation and optimum design of valve train for cam engine with the counter position placement. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 66-68. 1234-1239. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.66-68.1234>
 16. Sun L.W., Su T.X., Xu J.F., Wang Q., Xu C.L., You G.D. Dynamics analysis and cam profile optimal design of the valve train in the diesel engine with high specific power. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 308-310. 1636-1640. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.308-310.1636>

Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Sagin S.V., Lutsenko O.A., Zaverkin A.V. Features of synthesis of optimal cam profiles for gas distribution mechanisms of transport vehicles

The article discusses the features of synthesizing optimal cam profiles for gas distribution mechanisms in vehicles, which play a key role in ensuring the efficiency, reliability, and environmental friendliness of power plants. The relevance of improving the design of internal combustion engines in the context of growing demands for resource conservation and reduction of operating costs is emphasized. It is shown that traditional methods of designing cam profiles do not fully take into account the complex relationships between the kinematic and dynamic characteristics of the valve mechanism, which leads to increased wear, noise, vibration, and reduced fuel efficiency.

A new methodology for synthesizing optimal cam profiles is proposed, based on the use of generalized mathematical models and methods of mathematical experiment planning. This allows the formation of optimal parameters for the accelerations of the tappet in different sections of its movement, taking into account the restrictions on the radius of curvature of the profile, contact stresses, the valve spring reserve coefficient, and the conditions for ensuring the continuous dynamics of the mechanism. The implementation of second-order mathematical plans made it possible to construct nomograms for determining the optimal parameters that ensure an increase in the completeness coefficient of the tappet lift diagram and a reduction in dynamic loads.

The results obtained prove that optimization of cam profiles contributes to reducing loads on gas distribution mechanism components, increasing its service life and reliability, as well as improving gas exchange processes in engine cylinders. This ensures an increase in power, fuel efficiency, and environmental performance of transport power plants. The developed approach is of practical importance both for the creation of new engines and for the modernization of existing designs, corresponding to current trends in the development of transport technologies.

The results of the study open up prospects for further automation of gas distribution mechanism design and integration of computer modeling into engineering practice. This allows for the creation of innovative solutions in the field of engine building, aimed at achieving high performance and durability of transport systems.

Keywords: transport, power plants, transport technologies, resource conservation, operation, automation, computer modeling, mathematical planning.

Фомін Олексій Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет, e-mail: fomin1985@ukr.net.

Логвіненко Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту, e-mail: logvinenko.mpm@gmail.com.

Сагін Сергій Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок, Національний університет «Одеська морська академія», e-mail: saginsergii@gmail.com

Луценко Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, e-mail: lutsenko@snu.edu.ua

Заверкін Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, e-mail: zaverkin@snu.edu.ua

Стаття подана 12.08.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 7 (293) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 17.09.2025 р.
Формат 60 x 84 1/8. Гарнітура Times.
Умов. друк. арк. 11,9. Обл.-вид. арк. 13,4.
Вид. № 3424.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com